

**BMVBS - Abschlussbericht**

**Förderkennzeichen 03BV119**

**Projektvorhaben:**

„Großversuch Porsche Boxster e“ im Rahmen der „Modellregion Elektromobilität Region Stuttgart“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

**Projektzeitraum:**

01.04.2010 - 30.11.2011



**Zuwendungsempfänger:**

Porsche Engineering Group GmbH  
Weissach, Porschestraße

## **Inhaltsverzeichnis:**

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1.	Aufgabenstellung	5
1.2.	Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens	6
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4.	Technisch, wissenschaftlicher Stand	7
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen/Institutionen	8
<b>2.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>9</b>
2.1.	<b>Gesamtfahrzeug</b>	<b>9</b>
2.1.1.	Konzept und Auslegung	9
2.1.2.	Aufbau und Package	16
2.1.3.	Erprobung	18
2.1.4.	Erprobungsergebnisse	20
2.1.5.	Wartung und Service der Fahrzeuge	33
2.1.6.	Energiemanagement	34
2.2.	<b>Thermomanagement</b>	<b>44</b>
2.2.1.	Auslegung des Fahrzeug-Thermomanagements	44
2.2.2.	Aufbau des Fahrzeug-Thermomanagements	44
2.3.	<b>Akustik</b>	<b>45</b>
2.3.1.	Geräuschanreicherung	45
2.3.2.	Geräuschqualität	49
2.3.3.	Schwingungskomfort/Karosseriezittern	50
2.4.	<b>HV-Batterie, HV-Laden</b>	<b>52</b>
2.4.1.	Technische Daten	53
2.4.2.	Aufbau und Test der Batterie	53
2.4.3.	Batteriemanagement	55
2.4.4.	HV - Laden	57
2.5.	<b>Fahrwerk, elektrische Lenkung und Bremssystem</b>	<b>59</b>
2.5.1.	Lagerung der E-Maschinen	59
2.5.2.	Rekuperationsbremssystem	59
2.5.3.	Häufigkeitsverteilung der Rekuperationsmomente in der Stuttgart-Runde	62
2.5.4.	Subjektive Beurteilung des Rekuperationsbremssystems	63
2.5.5.	Systemabsicherung und Straßenfreigabe	64
2.5.6.	Reduzierung der Fahrwiderstände	66
2.6.	<b>Elektroantrieb, Antriebsmanagement</b>	<b>67</b>
2.6.1.	Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkombinationen	68
2.6.2.	Auslegung der Antriebsstrangkomponenten	69
2.6.3.	Abgleich der Simulation mit Messungen und Parametervariation	70
2.6.4.	Festlegung des 2WD Antriebssystems	71
2.6.5.	Festlegung des 4WD Antriebssystems	74

<b>2.7. Klimatisierung, Sicherheitskonzept .....</b>	<b>80</b>
2.7.1. Heizsystem.....	80
2.7.2. Kältekreislauf Klimaanlage .....	81
2.7.3. HV-Batteriekühlung .....	82
<b>2.8. Bordnetz mit DC/DC Wandler .....</b>	<b>83</b>
<b>2.9. Anzeigen.....</b>	<b>85</b>
2.9.1. Reichweitenassistent im Boxster e.....	85
2.9.2. Umgesetzte Funktionalitäten des Reichweitenassistenten.....	86
2.9.3. Kommunikationsschnittstelle zum Reichweitenassistenten.....	88
2.9.4. Umgesetztes Anzeigekonzept des Reichweitenassistenten.....	88
<b>3. Erfolgskontrollbericht .....</b>	<b>90</b>
<b>3.1. Beitrag der Projektergebnisse zu den förderpolitischen Zielen .....</b>	<b>90</b>
<b>3.2. Wichtige wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens .....</b>	<b>90</b>
3.2.1. Konzept und Auslegung .....	90
3.2.2. Thermomanagement .....	91
3.2.3. Akustik.....	92
3.2.4. HV-Batterie, HV-Laden.....	93
3.2.5. Fahrwerk, elektrische Lenkung, Bremssystem .....	94
3.2.6. Elektroantrieb, Antriebsmanagement.....	95
3.2.7. Klimatisierung, Sicherheitskonzept.....	95
3.2.8. 12V System mit DC/DC-Wandler, Bordnetz.....	96
3.2.9. Anzeigen .....	97
3.2.10. Erprobungsergebnisse .....	97
3.2.11. Energiemanagement .....	99
<b>3.3. Fortschreibung des Verwertungsplans.....</b>	<b>100</b>
<b>3.4. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung .....</b>	<b>102</b>

## **Abbildungsverzeichnis:**

Abbildung 1: Aufbau und Zeitplan der Themenblöcke .....	7
Abbildung 2: Arbeitspakete .....	9
Abbildung 3: Aus Simulationsrechnungen hergeleiteter Vergleich der Energieverbräuche	14
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Hauptbauräume der Baureihe 987 Boxster.	15
Abbildung 5: Motorisierungsvarianten.....	16
Abbildung 6: Anordnung der Elektro-Komponenten .....	17
Abbildung 7: Integration der Komponenten .....	18
Abbildung 8: Boxster e - Laufleistung (Stand: Feb. 2012).....	20
Abbildung 9: Verwendungsübersicht Boxster e.....	21
Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung: Anzahl Fahrten pro Tag.....	21
Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung: Fahrtstrecke in Kilometer pro Trip .....	22
Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung: Fahrtstrecke in Kilometer pro Tag.....	23
Abbildung 13: Ladeverhalten: Fahrtstrecke zwischen zwei Ladevorgängen.....	23
Abbildung 14: Energieverbrauch pro Trip .....	24
Abbildung 15: Relative Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit im Alltagsbetrieb .....	25
Abbildung 16: Zeitklassierung der mechanischen Leistung der hinteren EM im Alltagsbetrieb .....	25
Abbildung 17: Überrollungsklassierung des Moments der EM auf dem Prüfgelände.....	26
Abbildung 18: Zeitklassierung der Statortemperaturen der EM auf dem Prüfgelände .....	27
Abbildung 19: Zeitklassierung der mechanischen Leistung der EM auf dem Prüfgelände	28
Abbildung 20: Zeitklassierung der elektrischen Leistung der EM auf dem Prüfgelände ...	28
Abbildung 21: Beurteilungskategorien Feldversuch "Boxster e" .....	30
Abbildung 22: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ-Zyklus .....	34
Abbildung 23: Energieverbrauch hinsichtlich Traktion bilanziert an der elektrischen Maschine.....	35
Abbildung 24: Energieverbrauch Gesamtfahrzeug .....	35
Abbildung 25: Verlauf der Stuttgart-Runde .....	37
Abbildung 26: Verbrauchsübersicht für Traktion bilanziert an der elektrischen Maschine	38
Abbildung 27: Verbrauch der Nebenaggregate in Abhängigkeit der Außentemperatur ....	39
Abbildung 28: Energieflussanalyse über alle 8 Verbrauchsmessungen gemittelt.....	40
Abbildung 29: Lastpunktverteilung bei Rekuperationsstufe "0" .....	41
Abbildung 30: Lastpunktverteilung bei Rekuperationsstufe "2" .....	41
Abbildung 31: Lastpunktverteilung bei Rekuperationsstufe "max" .....	42
Abbildung 32: Prozentuale Energieverteilung in Abhängigkeit des Lastmoments bei vorausschauender Fahrweise .....	42
Abbildung 33: Prozentuale Energieverteilung in Abhängigkeit des Lastmoments bei normaler Fahrweise.....	43
Abbildung 34: Prozentuale Energieverteilung in Abhängigkeit des Lastmoments bei sportlicher Fahrweise .....	43
Abbildung 35: HT- und NT- Kreislauf .....	45
Abbildung 36: Ziele und untersuchte Varianten Active Sound Design .....	46
Abbildung 37: Signalerzeugungsprinzip Active Sound Design .....	47
Abbildung 38: Außengeräuschmesswerte Porsche Boxster e mit und ohne Active Sound Design .....	48

Abbildung 39: Lagerungskonzepte.....	51
Abbildung 40: MKS-Modell zur schwingungsdynamischen Untersuchung der Batterieblockanbindung .....	52
Abbildung 41: Der zentrale Tragrahmen aus Aluminium .....	53
Abbildung 42: EMV Beschichtung aus leitfähigem Lack.....	54
Abbildung 43: Im oberen Bereich sind Schütze, Sicherungen und die Hochvoltverteilung untergebracht. ....	55
Abbildung 44: Homogene Wärmeverteilung in der Kühlplatte .....	56
Abbildung 45: 3,3 kW Ladegerät .....	57
Abbildung 46: Ladedose .....	58
Abbildung 47: Festigkeitsberechnung der EM-Lagerung an der Vorderachse.....	59
Abbildung 48: Hydraulikschaltplan des ESP 9 hev der Firma Bosch.....	60
Abbildung 49: Überblendung der Bremsmomente im ESP9hev Rekuperationsbremssystem .....	61
Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der Antriebs- und Rekuperationsmomente.....	63
Abbildung 51: Unterdruckversorgung im 987_Boxster e.....	64
Abbildung 52: Zusammenhang zwischen Pumpenanläufen und Fahrzeuggeschwindigkeit	65
Abbildung 53: Aufbau des Simulationsmodells .....	68
Abbildung 54: Beispiel für den Abgleich mit Messungen.....	70
Abbildung 55: Parametervariation Batteriekapazität .....	71
Abbildung 56: Elektrische Antriebseinheit .....	72
Abbildung 57: Hinterachse mit E-Antriebseinheit.....	74
Abbildung 58: Vorderachse mit E-Antriebseinheit.....	75
Abbildung 59: Beölungsmaßnahmen Gehäuse 1 .....	76
Abbildung 60: Beölungsmaßnahmen Gehäuse 2.....	76
Abbildung 61: Getriebe mit externer Ölpumpe für Einsatz an Vorderachse.....	77
Abbildung 62: Glasgetriebe für Beölungsversuche.....	77
Abbildung 63: Temperaturmessung mit geänderter Beölung .....	78
Abbildung 64: Temperaturmessung mit ursprünglicher Beölung .....	79
Abbildung 65: Deratingverhalten der beiden E Maschinen .....	79
Abbildung 66: Energiescreen .....	88
Abbildung 67: Darstellung von Reichweitengewinnen .....	89
Abbildung 68: Darstellung des Energiehaushalts .....	89
Abbildung 69: Vergleich der Fahrkomfortspektren am Boxster e und am Serienboxster .	92

## **Tabellenverzeichnis:**

Tabelle 1: Festlegung der Zielwerte .....	10
Tabelle 2: Finale technische Daten.....	12
Tabelle 3: Vergleich Leistungsbereitstellung Antriebskonzepte .....	13
Tabelle 4: Anteile an rückgewonnener Energie auf PG .....	29
Tabelle 5: Fahrzeugbeurteilung Übersicht.....	30
Tabelle 6: Übersicht Verbrauchsmessungen Stuttgart-Runde.....	38
Tabelle 7: Patentanmeldungen .....	101
Tabelle 8: Kosten- und Zeitplanung .....	102

## 1. Einleitung

### 1.1. Aufgabenstellung

Die Welt der Mobilität steht in den nächsten Jahren vor einem Paradigmenwandel. Im Hinblick auf die zukünftige Ölverfügbarkeit, erwartete Erderwärmung und zunehmende Verkehrsprobleme in den Ballungsräumen sind neue Lösungen dringend erforderlich. Eine mögliche Lösung ist die Umstellung der Mobilität auf Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Das globale Ölfördermaximum (englisch *peak oil*) ist nach Einschätzung der Internationalen Energieagentur (IEA) bereits heute erreicht und kann nur auf konstanten Niveau gehalten werden, wenn die Förderung an noch nicht erschlossenen Ölfeldern beginnt.

Deswegen sind bereits heute gezielte Anstrengungen für die Entwicklung der Technologie unbedingt notwendig.

Im Hinblick auf diese Entwicklung ist im April 2010 das Projekt „**Großversuch Porsche Boxster e**“ im Rahmen der „Modellregion Elektromobilität Region Stuttgart“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gestartet worden. Das Gesamtprojektziel ist die Schaffung einer Know-how Basis in den Bereichen Kundenanforderungen und Technik für die Entwicklung marktfähiger Elektroautos im Premiumsegment und ihre Einbindung in die neuartige Infrastruktur.

Hierzu sollte in der ersten Projektphase ein Sportwagen-Elektrofahrzeug auf Basis des Porsche Boxster (Typ 987II) konzipiert und im Folgenden auf dieser Basis drei Aggregateträger aufgebaut, in Betrieb genommen und erprobt werden. Zur Erzielung des geplanten Know-how Gewinns sollte sowohl eine Nutzung der Fahrzeuge im Versuchsbetrieb als auch im täglichen Einsatz für normale Transportaufgaben im Großraum Stuttgart durch Mitarbeitern der Porsche AG erfolgen. Dadurch konnte auch die angestrebte Präsenz der „Boxster e“ in der Modellregion Stuttgart gewährleistet werden.

Zudem bestand die Aufgabe in wesentlichen Themenschwerpunkten die Kenntnisse über BEV's voranzutreiben:

- Auslegung eines elektrischen Antriebs und seiner Einzelkomponenten
- Betriebsstrategien für optimalen Verbrauch und Performance
- Erprobung der Ladestrategien von Batterien / Dauerhaltbarkeit von Batterien
- Auslegung, Abstimmung und Optimierung der Nebenaggregate (Bremse, Lenkung, Heizung/Klima)
- Integration in die zu erstellende Infrastruktur / Car to Grid
- Erfassung der Nutzungsprofile / Kundenanforderungen / Kundenakzeptanz
- Anpassung der Fahrzeugeigenschaften an veränderte Kundennutzung, Optimierung Kundenakzeptanz
- Ermittlung der Strombedarfe, Wirtschaftlichkeit eines Elektrofahrzeugs
- Sicherheitsanforderungen an das Gesamtfahrzeug und die elektrischen Systeme
- Integration eines Soundgenerators
- Untersuchung der Sicherheitsaspekte bzgl. Umwelt / Fußgänger
- Klimatests Winter/Sommer

- Gewichts- und Aerodynamik-Optimierung
- Optimierung der fahrdynamischen Eigenschaften eines Elektroautos
- Zuverlässigkeitstest, Wartbarkeit
- Anforderungen durch Vernetzung mit der Infrastruktur
- Elektroauto als Baustein für intelligente & multimodale Mobilitätskonzepte
- Grundlagen für die Entwicklung möglicher Geschäftsmodelle und Dienstleistungsgeschäftskonzepte
- Schaffung der Grundlagen für einen Anforderungskatalog E-Sportwagen
- Erfahrung zur Ableitung von Simulationsmodellen, Nutzungsprofilen, Grenzbetriebsbedingungen, Lastkollektiven, Erkennung spezifischer Problemkreise

## **1.2. Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens**

Das Projekt „Großversuch Porsche Boxster e“ war ursprünglich auf eine Laufzeit von 15 Monaten ausgelegt (01. April 2010 bis 30. Juni 2011). Diese wurde jedoch aufgrund der Komplexität der Arbeitsfelder rund um die „Porsche Boxster e“ und zur Sicherstellung der angestrebten Ziele im Bereich des Fahrkomforts und der Zuverlässigkeit um fünf Monate verlängert (Projektende: 30. November 2011). Zudem stellte sich durch den Prototypenstatus vieler Komponenten ein erhöhter Zeitaufwand in der Beschaffung von spezifischen Bauteilen (z.B. Ladegeräte, HV-Komponenten, etc.) ein, so dass oftmals lange Lieferzeiten eingeplant werden mussten.

Nahezu alle elektrischen Bauteile wiesen im Projektzeitraum noch einen sehr frühen Entwicklungsstand bezüglich der Anforderungen im Automotivbereich auf. Bedingt durch die geringe Verfügbarkeit von Bauteilen musste in vielen Fällen auf Einzelfertigungen und Vorserienteile zurückgegriffen werden, wodurch neben den bereits erwähnten langen Lieferzeiten zumeist sehr hohe Beschaffungskosten anfielen.

In Hinblick auf den allgemein niedrigen Entwicklungsstand sowie den fehlenden Serienstandard vieler Komponenten war es zudem unter Umständen notwendig einen Entwicklungskostenbeitrag an Zulieferer zu leisten. Aus diesem Grund war es in diesem Projekt dringend notwendig einen Beitrag zur Grundlagenforschung im Umgang mit neuen Technologien im Bereich e-Mobility zu leisten. Durch den enormen finanziellen und zeitlichen Aufwand sowie dem Erfolgsrisiko des Forschungsprojektes war die Förderung letztlich ausschlaggebend zur Durchführung des Vorhabens durch die Porsche AG.

## **1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Projektplanung des „Großversuchs Porsche Boxster e“ koordinierte Experten aus allen Bereichen wie Antrieb, Elektrik, Fahrwerk, Karosserie, Simulation, Erprobung und Messtechnik.

Der Ablauf des Projekts lässt sich in drei Projektphasen (Abbildung 1) mit den dargestellten Inhaltsschwerpunkten gliedern.

Nachdem die Fahrzeuge in der ersten Phase erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden konnten, folgte anschließend die betriebsinterne Erprobungsphase. Zeitgleich wurde der aktuelle Entwicklungsstand der Fahrzeuge regelmäßig bei Veranstaltungen der Öffentlichkeit vorgestellt (z.B. IAA, Challenge Bibendum,...). Ab Anfang 2011 (Inbetriebnahme des ersten Fahrzeugs) wurden die drei Hauptarbeitspakete Aufbau/permanente Optimierung, Erprobung und Analyse bis zum Projektende parallel durchgeführt, so dass Ergebnisse aus Erprobung und Analyse kontinuierlich in Fahrzeugverbesserungen bei Hard- und Software einfließen konnten.

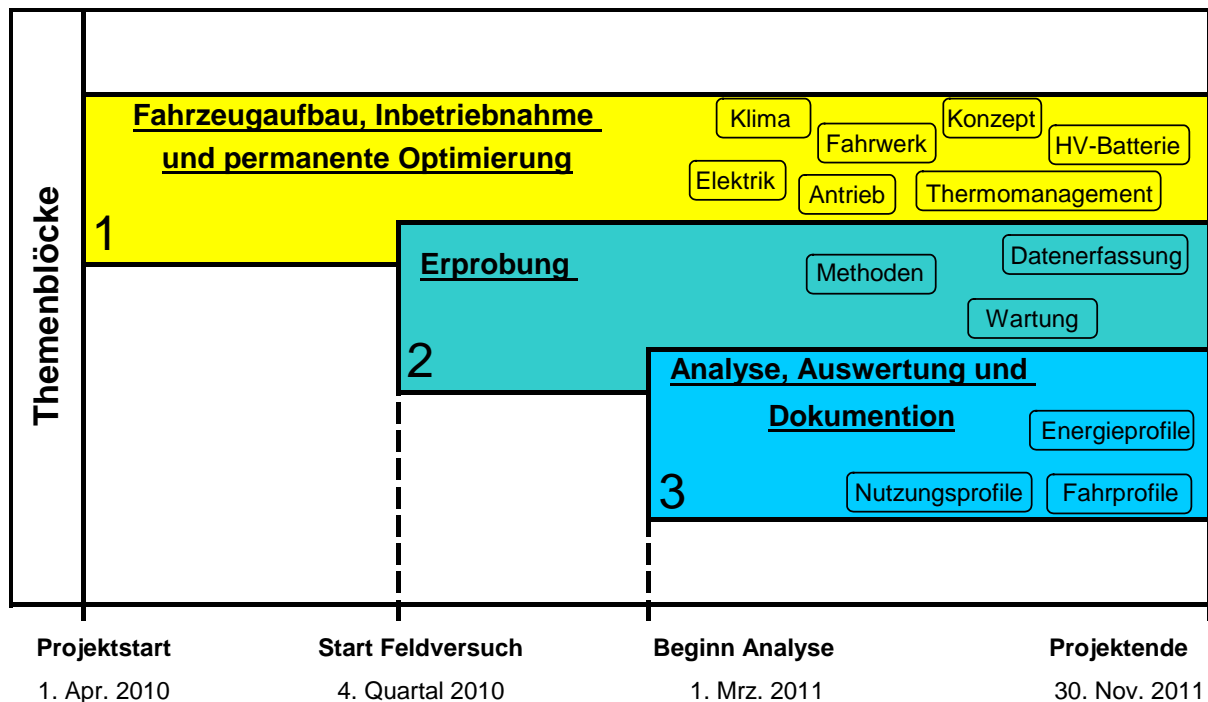


Abbildung 1: Aufbau und Zeitplan der Themenblöcke

#### 1.4. Technisch, wissenschaftlicher Stand

Die Firma Porsche blickt im Bereich alternative Antriebstechnologien und Umweltschutz auf eine lange Tradition zurück. Bereits 1900 konstruierte Firmengründer Ferdinand Porsche mit dem Lohner Porsche Semper Vivus den ersten serienmäßigen Hybrid-Antrieb. Mit der Entwicklung modernster Technologien zur Senkung von Spritverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen (z.B. Auto Start-Stop-Funktion, PDK, Hybridisierung) verdeutlicht das Unternehmen, dass sich die Attribute Sportlichkeit und Nachhaltigkeit nicht ausschließen.

Bei der Entwicklung der rein elektrisch betriebenen „Boxster e“ konnte dementsprechend auf bereits bekannte und bestehende Konstruktionen und Technologien zurückgegriffen werden (Cayenne Hybrid, Panamera Hybrid und dem Plug-In Hybrid 918).

Neben den Erfahrungen aus der Serienfahrzeugentwicklung konnte im laufenden Projekt auf das Know-how des Motorsportbereichs zurückgegriffen werden. Der 911 GT3 R Hybrid ist der erste Porsche-Rennwagen mit elektrischem Vorderachsantrieb und Schwungradspeicher.



Diese Fahrzeuge stellen jeweils einen Meilenstein in der Porsche Strategie zur Elektromobilität dar und bieten wichtige Erkenntnisse zur Auslegung des Gesamtkonzepts „Boxster e“ sowie der Bereiche Batterietechnologie, Elektrischer Antrieb, Nebenaggregate und Infrastruktur.

Die Breite der Anwendungen von Parallel-, Seriell-, Plug-In-Hybrid, Range Extender bis zum BEV in unterschiedlichen Ausprägungen zeigt aber auch die große Unsicherheit, welche Antriebstopologien, Technologien bei Antriebskomponenten, Batterien und Nebenaggregaten oder im Energiemanagement zu marktfähigen Lösungen führen.

Ein Mainstream bei der Grundlagenforschung ist weder bei deutschen, europäischen oder außereuropäischen Forschungsprojekten erkennbar.

Dies gilt, obwohl elektrische Antriebskomponenten grundsätzlich in Bereichen außerhalb der Automobilindustrie in Anwendung sind. Allerdings fehlen noch wesentliche Kenntnisse über das Zusammenspiel im Automobil auf Gesamtfahrzeugebene, über Grenzbetriebsbedingungen und ihre Erfüllung, über Zuverlässigkeit der Systeme, Kundennutzen und -anforderungen, veränderte Belastungen der Fahrzeugkomponenten und standardisierte Komponentenanforderungen.

Mit den Hybriden wurde der Weg in die E-Mobilität begonnen, allerdings weisen vollelektrische Fahrzeuge wie der „Boxster e“ aber gegenüber den Hybriden nochmals einen deutlich höheren Komplexitätsgrad auf.

Weltweit lagen bei Projektstart kaum Kenntnisse vor, wie die besonders hohen Anforderungen im Premiumsegment z.B. bei Performance, Fahrverhalten, Komfort und Zuverlässigkeit zu erfüllen sind.

## **1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen/Institutionen**

Die Implementierung des Pilotprojekts „Boxster e“ wurde in enger Zusammenarbeit mit der regionalen Projektleitstelle der Modellregion Stuttgart und dem Stromversorger EnBW Energie Baden-Württemberg AG durchgeführt. Diese Kooperationen waren essentiell für den Erfolg des Projekts und dienten einer optimalen Abstimmung der Projektpartner untereinander.

Für einen zügigen Aufbau der Infrastruktur für Elektrofahrzeuge ist vor allem eine Kooperation zwischen Automobilherstellern und Energieversorgern dringend erforderlich. Durch die enge Zusammenarbeit von Porsche und der EnBW konnte speziell in diesem Bereich frühzeitig gemeinsames Know-how generiert werden.

Neben der Elektrifizierung des Antriebsstranges galt es unter anderem die Nebenaggregate auf die veränderten Anforderungen in einem Elektrofahrzeug anzupassen. Dahingehend mussten die verwendeten Komponenten im Vergleich zur Serienversion des Boxster grundlegend überdacht werden. Ein entscheidender Faktor für die Qualität des Boxster e war die Auswahl der Hochvolt-Komponenten. Bei den Bauteilen

der Leistungselektronik und Ladekomponenten hat Porsche mit den Elektronik-Spezialisten der Robert Bosch GmbH und der Brusa Elektronik AG zusammengearbeitet. Zudem wurde in Kooperation mit Bosch die Applizierung und Optimierung der Fahrwerkregelsysteme ABS und PSM extern durchgeführt.

In den Bereichen Elektro-Antrieb und Traktionsbatterie hingegen wurden Spezialisten der Porsche Engineering Services und Volkswagen AG einbezogen.

## 2. Ergebnisse

### 2.1. Gesamtfahrzeug

#### 2.1.1. Konzept und Auslegung

#### Projektsteuerung von Fahrzeugkonzeption und Aufbau

Die Realisierung von drei voll straßentauglichen Elektrofahrzeugen innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens von zunächst 15 Monaten erforderte effiziente und zielgerichtete Arbeitsprozesse.

Das für das Boxster e Sonderprojekt zusammengestellte Projektteam war in 12 Aufgabenpakete gegliedert (Abbildung 2), die von Experten bearbeitet wurden.

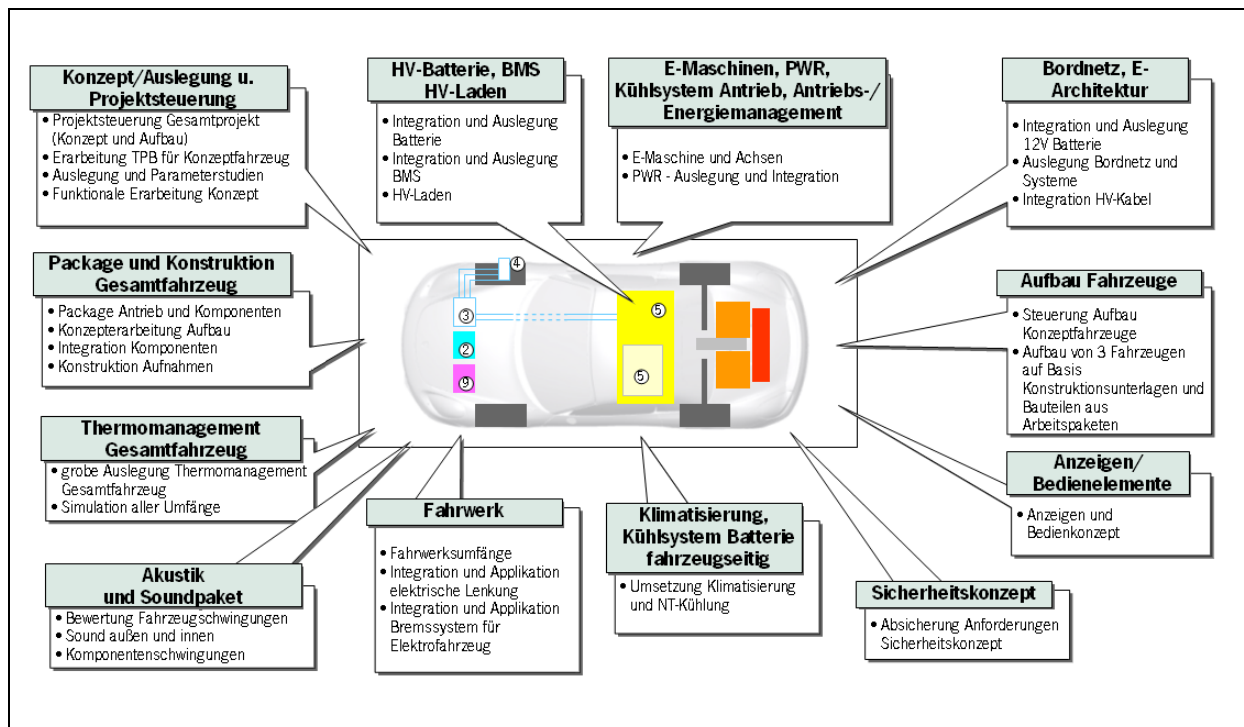


Abbildung 2: Arbeitspakete

## Erarbeitung der technischen Produktbeschreibung

Die Ausarbeitung der technischen Produktbeschreibung erfolgte im Vorfeld auf Basis produktstrategischer und projektspezifischer Randbedingungen und Zielsetzungen.

### Produktstrategie Konzept

- Elektro-Versuchsfahrzeug auf Basis Boxster 987
- im Spannungsfeld Performance/Reichweite: „Boxster-Performance mit urbaner Reichweite“
- Einsatz von 3 Fahrzeugen im Rahmen „Modellregion Stuttgart“
- Erprobung von Komponenten und Erfassung von Fahr- und Nutzungsprofilen im Kundenbetrieb
- Steigerung der sozialen Akzeptanz
- Erhalt von Sportlichkeit & Alltagstauglichkeit
- moderne Mobilität erleben
- Demonstration eines zukunftsfähigen Elektroantriebskonzept
- adaptive Reichweite

Auf dieser Grundlage erfolgte die erste Festlegung des technischen Zielsystems:

	Zielwert
Gewicht	1500kg
max. Leistung	240kW
Leistungsgewicht	4,7kg/PS
Verbrauch NEFZ	150Wh/km
0-100 km/h	5,8 sec
Höchstgeschwindigkeit	250km/h
Reichweite NEFZ 90% DOD	200km
Batteriekapazität	33kWh
Fahrzeugdimensionen	wie Boxster MJ 2010

**Tabelle 1: Festlegung der Zielwerte**

### Ziele Karosserie Exterieur

- Serienkarosserie 987 II ggf. mit Carrera 4 Vorderwagen und mit Aufnahmen für HV- Batterie und E- Motor
- Verwendung von Leichtbaukomponenten
- Serien-Verdeck

### Ziele Karosserie Interieur

- Hochvolt-Batteriekühlung über Fluidkreislauf (Wasser/Glykol) zur Darstellung einer Kühlung unter 4°C

- Chiller (AC-/ Wasser- Wärmetauscher) zur zusätzlichen Kühlung der HV- Batterie zu bewerten
- elektrischer Klimakompressor zur Fahrzeug- und Komponentenklimatisierung
- PTC-Heizer zum Aufheizen des Innenraums
- Sportschalensitz mit optionaler Umrüstung auf Sportsitz mit Sitzheizung

### Ziele Antrieb

- Allradantrieb konzeptionell für zukünftigen e-Baukasten geeignet
- Getriebe mit fester Übersetzung

### Ziele Elektrik

- Ziel 33 kWh Traktionsbatterie im Bauraum des Verbrennungsmotors
- Verwendung von zukünftigen Serienzellen
- 3,3 kW HV-Ladegerät, 22 kW prüfen
- Mennekes Ladebuchse im Tankeinfüllbereich
- Semikron/Drivetec Pulswechselrichter (PWR)
- Minimierung des Bordnetzverbrauches

### Fahrwerk

- Serienfahrwerk auf BEV- Gewicht angepasst
- Bremssystem ESP 9hev
- elektromechanisches Lenksystem aus Sportwagenbaukasten

### USP, Highlights

- intelligenter Reichweiten Manager
- einstellbare Rekuperation (Schleppmoment)
- attraktiver Sound innen/ außen
- On-Grid (am Netz) Vorheizen und -kühlen für höher Reichweite
- intelligentes bedarfsorientiertes Lademanagement
- keine direkte Emission
- Torque Vectoring an allen 4 Rädern zu prüfen

Ein Großteil der im technischen Zielsystem festgelegten Ziele und Funktionen konnte im Verlauf des Projekts in den Versuchsfahrzeugen umgesetzt und realisiert werden. So liegen die Fahrleistung des 4WD Fahrzeuges wie ursprünglich geplant auf ähnlich hohem Niveau wie die eines verbrennungsmotorisch angetriebenen Boxster S Serienfahrzeuges der Baureihe 987 Modelljahr 2010.

In einigen Fällen wurden aber auch ursprünglich festgelegte Ziele im Verlauf des Projekts aufgrund neuer Erkenntnisse oder geänderter Randbedingungen neu definiert. So wurde beispielsweise die Entscheidung getroffen auf Grund der kurzen Projektlaufzeit auf vorhandene Antriebskomponenten aus dem VW-Konzern zurückzugreifen.

Diese Entscheidung half, die Komplexität des Gesamtsystems Elektroantrieb zu reduzieren ohne dabei Nachteile für den Aufbau von neuem Know-how in Kauf zu nehmen. Bauartbedingt lassen diese Komponenten jedoch „nur“ Geschwindigkeiten bis maximal 200 km/h zu, so dass das zu Beginn des Projekts festgelegte Ziel für die Höchstgeschwindigkeit von 240 km/h auf 200 km/h geändert wurde.

Der Beschluss eine 2WD und eine 4WD Variante aufzubauen erhöhte zwar einerseits die Gesamtkomplexität, ermöglichte es aber andererseits früher mit der einfacheren 2WD Variante in die Fahrerprobung einzutreten.

Die finalen technischen Fahrzeugdaten für die ein- und zweimotorige Motorisierungsvariante ergeben sich wie folgt:

		einmotorig Hinterradantrieb	zweimotorig Allradantrieb
Gewicht:	Leergewicht	1520 kg	1690 kg
Abmessungen:	Länge/Breite/Höhe	4324 / 1801 / 1292 mm	
Antrieb:	Nennleistung bei Drehzahl Drehmoment Getriebe mit fester Übersetzung	90 kW 12000 rpm 270 Nm i = 9,81	180 kW 12000 rpm 540 Nm i = 6,9
Batterie (Lithium Eisen Phosphat):	Energieinhalt nutzbare Energie max. Leistung Gewicht	29 kWh 26 kWh 240 kW 341 kg	29 kWh 26 kWh 240 kW 341 kg
Fahrleistungen:	0 - 100 km/h $v_{max}$ angestrebte Reichweite im NEFZ	ca. 9,8 s 150 km/h ca. 170 km	ca. 5,5 s 200 km/h ca. 170 km

**Tabelle 2: Finale technische Daten**

### Durchgeführte Auslegungsrechnungen und Parameterstudien zu Fahrleistungen und zum Energiebedarf

Elektromotoren haben im System Fahrzeug einen besseren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren. Ein weiterer, prinzipbedingter Unterschied ist die hohe Belastbarkeit für kurze Zeit von Elektromotoren, allerdings auch die hohe Differenz zur Dauerbelastbarkeit. Der grundsätzlich andere Verlauf der Vollastlinie führt zu einer völlig veränderten Fahrcharakteristik.

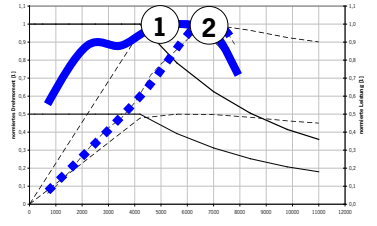
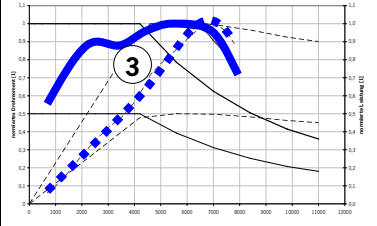
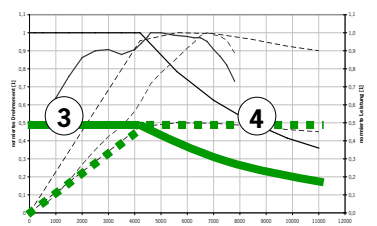
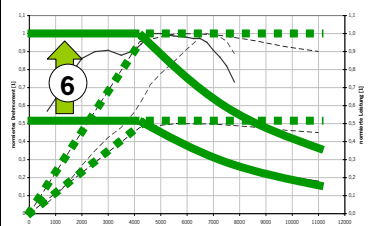
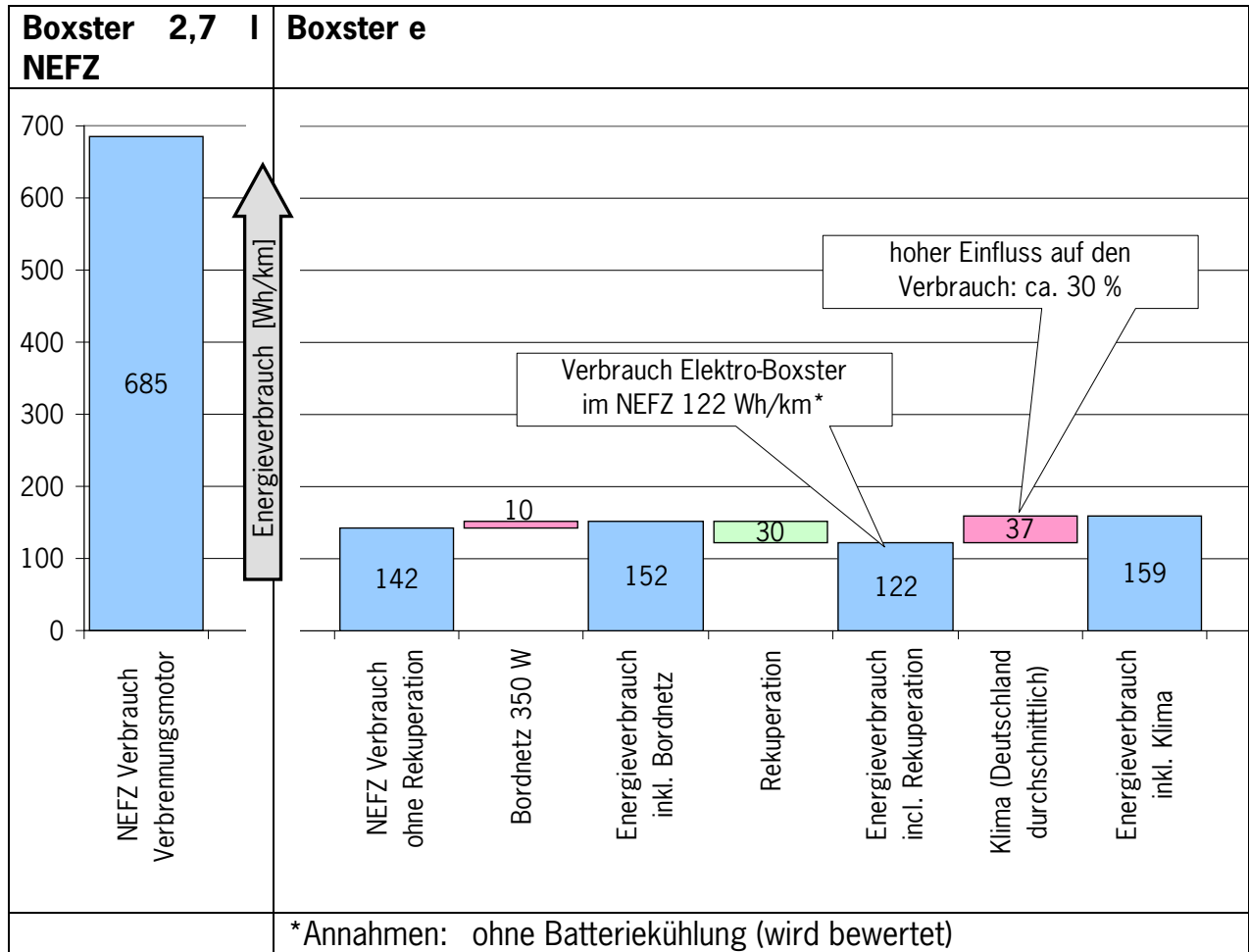
	Wirkungs- grad	Leistung Drehmoment /	Belastung	Masse
<b>Verbrennungsmotor</b>	Motor/Getriebe $\eta_{V-Motor} < 30\%$  Energieaufwand im Zyklus  keine Rekuperation	1) maximales Drehmoment bei mittleren Drehzahlen • mehrstufiges Getriebe notwendig 2) maximale Leistung in engem Drehzahlband	3) Leistung und Drehmoment stehen dauerhaft zur Verfügung	• Gewicht inkl. Getriebe  $m_{V-Motor} 300kg$
				
<b>Elektromotor</b>	Motor/Getriebe $\eta_{E-Motor} < 80\%$  Energieaufwand im Zyklus  Verbesserung durch Rekuperation	4) maximales Drehmoment ab der ersten Umdrehung • nur 1 bis 2-stufiges Getriebe notwendig 5) konstante maximale Leistung ab mittlerer Drehzahl	6) doppelte Überlastung der Leistung und des Moments möglich	• Gewicht inkl. Getriebe  $m_{E-Motor} 150kg$
				

Tabelle 3: Vergleich Leistungsbereitstellung Antriebskonzepte

Der bessere Wirkungsgrad des Elektroantriebs führt zu einem wesentlich geringeren Energieverbrauch. Der Energiebedarf des Bordnetzes und des Klima- und Heizgeräts hat deshalb einen sehr viel größeren relativen Einfluss auf die Reichweite. Starke Schwankungen der Reichweite in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen sind zu erwarten.



**Abbildung 3: Aus Simulationsrechnungen hergeleiteter Vergleich der Energieverbräuche**

### Funktionale Erarbeitung des Gesamtkonzeptes

Das technische Zielsystem liefert sämtliche Eingangsgrößen zur Erarbeitung des Gesamtfahrzeugkonzeptes. Im Falle des Boxster e waren fünf Konzept bestimmende Grundanforderungen von besonderer Bedeutung, die sich in erster Linie aus projektspezifischen Anforderungen herleiteten.

1. Verwendung Serienkarosserie Boxster (Mittelmotorbaureihe 987)
2. Crashesicherheit auf Serienniveau
3. Zeitrahmen
4. Kostenrahmen
5. Fahrperformanceziele

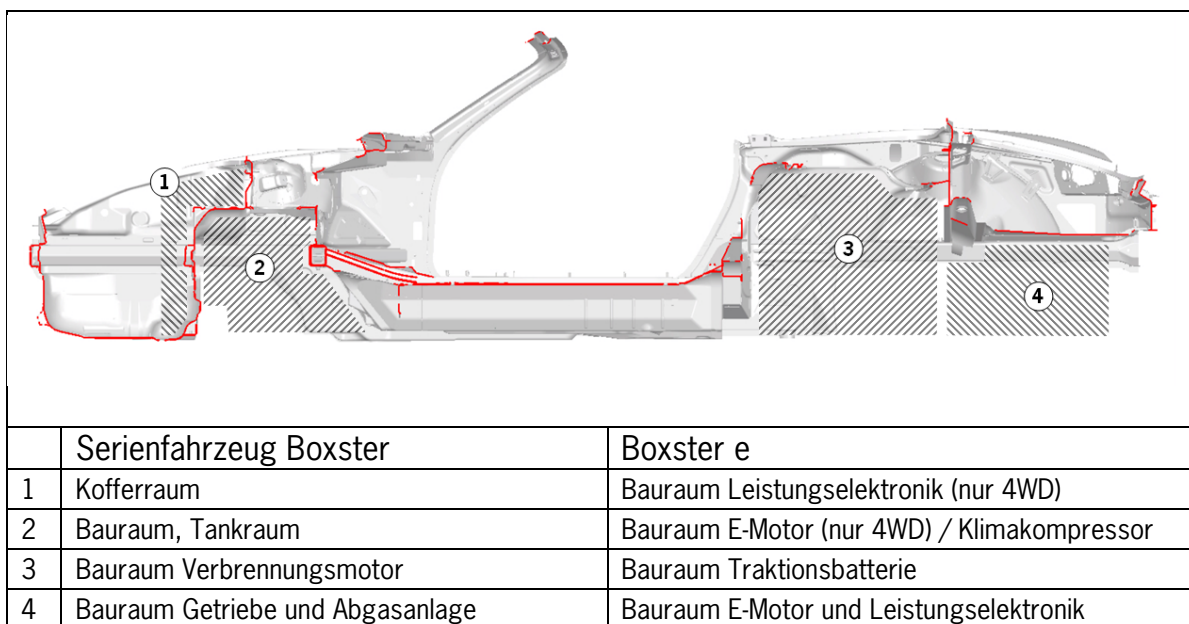
Die Verwendung der Serienkarosserie gab die grundlegenden Bauräume im Fahrzeug vor. Aus den Anforderungen „Crashesicherheit“, „Zeit-“ und „Kostenrahmen“ ergab sich die Notwendigkeit, die Crashstruktur der Serienkarosserie vollständig zu erhalten. Im vorhandene Zeit- und Kostenrahmen war sowohl die Integration als auch die Funktionsabsicherung von alternativen Karosseriestrukturen zur Kompensierung von Änderungen an der Serienstruktur nur begrenzt möglich.

Damit verdichteten sich die Randbedingungen für die Erschließung von Bauräumen zur Integration der Antriebskomponenten und elektrofahrzeugspezifischen Bauteile im Gesamtfahrzeug zusätzlich.

Um unter gegebenen Termin- und Kostenvorgaben eine optimale Fahrperformance zu realisieren, kamen im Fahrzeug die Serienfahrwerkskomponenten zum Einsatz. Gleiche Gründe führten auch bei der Wahl der Antriebskomponenten zur Entscheidung, vorhandene Module aus dem VW-Konzern zu verwenden.

In Summe waren damit bereits mehrere konzeptrelevante Faktoren vordefiniert, was Freiheitsgrade und Spielräume für die Konzeptfindung und -erarbeitung bereits im Vorfeld einschränkte.

Während des Projektes konnte jedoch die Erkenntnis gewonnen werden, dass aus der Mittelmotor Konstellation des Serienfahrzeugs ausgesprochen günstige Randbedingungen hervorgehen, welche die Integration sämtlicher Antriebskomponenten und Elektrofahrzeug spezifischer Bauteile gelingen ließen, ohne dabei große technische Kompromisse in Kauf zu nehmen.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung der Hauptbauräume der Baureihe 987 Boxster**

Das Mittelmotorkonzept des Serienfahrzeuges eignet sich demnach sehr gut für die Überführung in ein Elektrofahrzeug mit „Mittelbatteriekonzept“, das sich darüber hinaus ebenfalls durch die vorteilhafte Achslastverteilung des Serienfahrzeuges auszeichnet.

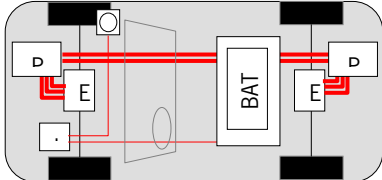
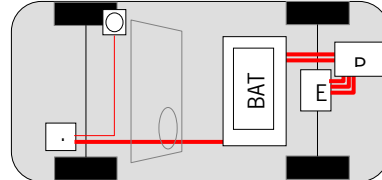
Mit der Unterbringung der Traktionsbatterie im Bauraum hinter dem Fahrgastraum (Abbildung 4) standen sowohl vorne als auch hinten im Fahrzeug günstige Bauräume zur Verfügung, die zur Integration von Elektromotoren mit zugehöriger Leistungselektronik geeignet waren.



Die zweimotorige Variante mit Allradantrieb (Abbildung 5) nutzt diese Bauräume vollständig aus, und integriert neben einem Elektromotor im Hinterwagen ein baugleiches Aggregat mit zugehöriger Leistungselektronik im Vorderwagen. Die daraus resultierende doppelte Antriebsleistung gegenüber der einmotorigen Variante ließ sich sogar mit einem verbesserten Achslastverhältnis kombinieren.

Die einmotorige Variante leitete sich durch den Entfall des vorderen Elektromotors und der zugehörigen Leistungselektronik direkt von der zweimotorigen Variante ab. Alle anderen Fahrzeugkomponenten wie Antriebsaggregate, Traktionsbatterie, On-Board-Ladegerät und Nebenaggregate für die Innenraumklimatisierung sind identisch mit der zweimotorigen Variante.

Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den beiden Varianten ließ sich mit dem einmotorigen Fahrzeug eine Ressourcen schonende Alternative zum zweimotorigen Fahrzeug realisieren, ohne dass sich daraus Nachteile für die Gewinnung von Erkenntnissen oder Forschungsergebnissen während des Fahrzeugbetriebs ergaben.

Motorisierungsvariante 1 - 4WD	Motorisierungsvariante 2 - 2WD
	
$v_{Max}$ ca. 200 km/h Leistung ca. 180 KW	$v_{Max}$ ca. 150 km/h Leistung ca. 90 KW

**Abbildung 5: Motorisierungsvarianten**

### 2.1.2. Aufbau und Package

#### Package Antrieb und Komponenten

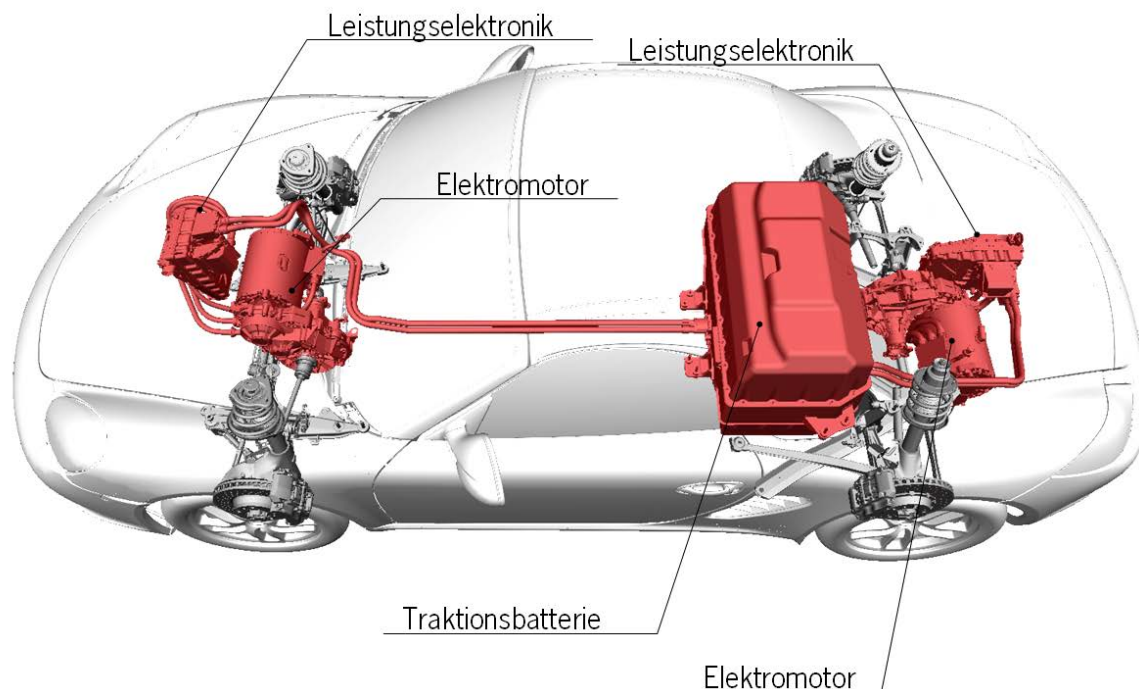
Beim zweimotorigen Fahrzeug wirken zwei Elektromotoren mit angeflanschem Übersetzungsgetriebe unabhängig voneinander und ohne mechanischem Durchtrieb zwischen den Achsen auf Vorder- und Hinterachse. Die zwei Elektromotoren werden dabei durch eine zentrale elektronische Steuereinheit synchronisiert. Aus der Erforschung dieses Zusammenspiels wird ein weiterer Know-how-Aufbau bezüglich elektrischer Antriebe erwartet.

Die Abstützmomente der Elektromotoren werden über bauraumoptimierte Aggregate-träger in die tragenden Karosseriestrukturen eingeleitet.

Jeder Elektromotor wird von einer Leistungselektronik angesteuert, die sich jeweils in unmittelbarer Nähe zum Elektromotor befinden. In Verbindung mit den gewählten

Anordnungen der Komponenten ließ sich die Länge der Phasenleitungen zwischen Elektromotor und Leistungselektronik kurz halten. Die für beide Antriebsvarianten durchgeführten EMV Tests bestätigten das erwartete gute Verhalten bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit.

Die Traktionsbatterie befindet sich hinter dem Fahrgastraum vor der Hinterachse, wo sich im Serienfahrzeug der Verbrennungsmotor befindet. Die in diesem Bauraum realisierte Nennkapazität der Traktionsbatterie liegt mit 29 kWh sehr nahe an dem ersten Ziel von 33 kWh.

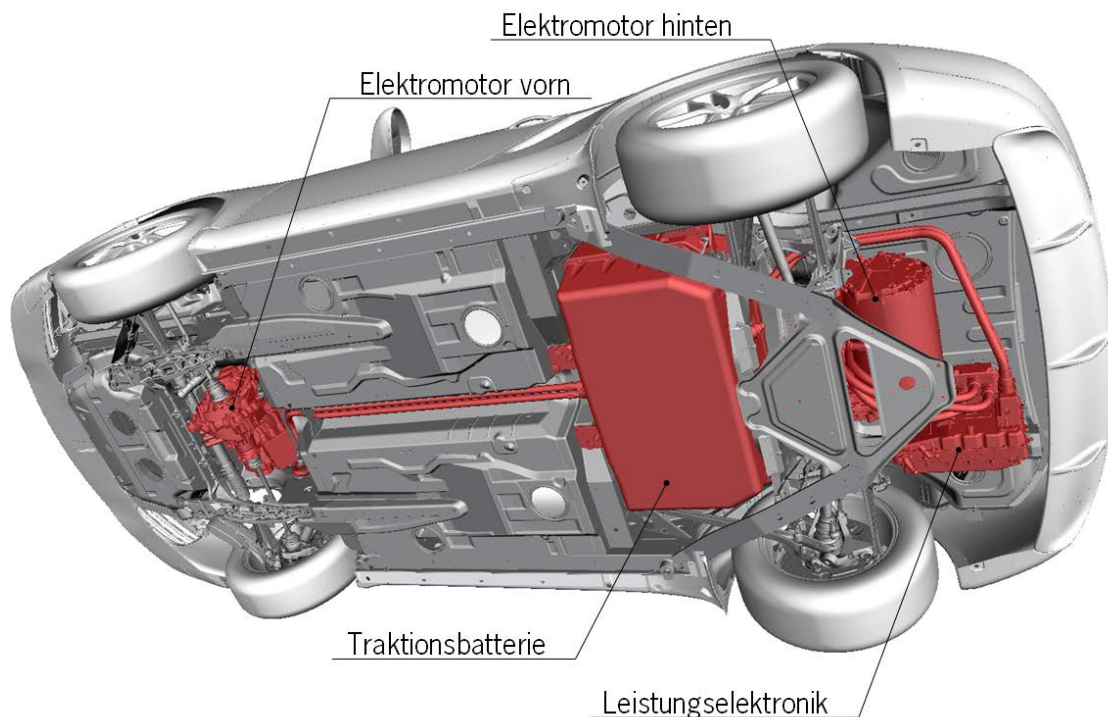


**Abbildung 6: Anordnung der Elektro-Komponenten**

### Integration der Komponenten in das Fahrzeug

Die Integration der elektrischen Antriebskomponenten im Fahrzeug konnte ohne strukturell relevante Änderungen an der Serienkarosserie realisiert werden. Alle Lastpfade der Karosserie mit ihrer besonderen Bedeutung für die Crashesicherheit des Fahrzeuges blieben somit erhalten. Der Fahrzeugschwerpunkt mit seiner großen Bedeutung für die Fahrperformance liegt sowohl beim ein- als auch beim zweimotorigen Fahrzeug nach wie vor sehr günstig.

An die Stelle des Verbrennungsmotors tritt beim Boxster e die Traktionsbatterie. Sie ist an denselben Anbindungspunkten der Karosseriestruktur befestigt wie beim Serienfahrzeug der Verbrennungsmotor. Somit werden im Falle eines Crashes die Kräfte über dieselben Lastpfade wie beim Serienfahrzeug in die Karosserie eingeleitet. Die Batterie ist somit optimal im Fahrzeug angebunden. Gleichzeitig wird sie durch ihre mittige Position im Fahrzeug von der umliegenden Karosseriestruktur vor Beschädigung geschützt. Zur Sicherstellung der Crashesicherheit wurden wesentliche Crashfälle in Simulationen dargestellt und positiv bestätigt.



**Abbildung 7: Integration der Komponenten**

Die Montage der Traktionsbatterie erfolgt, wie die Montage des Verbrennungsmotors beim Serienfahrzeug, von unten. Die Kühlwasserleitungen sind über Spezialverschlüsse mit der Batterie verbunden, die bei befülltem Kühlsystem abgetrennt werden können und somit für äußerst kurze Montage- bzw. Demontagezeiten der Batterie sorgen. So gelingt einem eingespielten Mechanikerteam der Aus- und Einbau der Traktionsbatterie in ca. einer Stunde.

Bei dem zweimotorigen Fahrzeug wird der durch den Entfall des Kraftstofftanks freigewordene Bauraum im Vorderwagen durch den zweiten Elektromotor mit angeflanschem Getriebe eingenommen. Hier befindet sich ebenfalls der für die Klimatisierung des Innenraums erforderliche Klimakompressor.

### 2.1.3. Erprobung

Nach erfolgreichem Abschluss der Dauerläuferprobung über eine Distanz von insgesamt 2000 km wurde Anfang 2011 die betriebsinterne Freigabe für das erste Fahrzeug mit Hinterradantrieb für den Betrieb im öffentlichen Straßenverkehr erteilt.

In der Zeit bis zum offiziellen Beginn der Felderprobung am 14.03.2011 lag der Fokus auf der weiteren Verfeinerung und Optimierung des bis dahin erreichten technischen Entwicklungsstands der 2WD-Fahrzeuge.

Die Schwerpunkte lagen dabei besonders im Bereich der Antriebs- und Bremssysteme, der aktiven Fahrzeugakustik, dem Ladebetrieb und der Fahrzeugklimatisierung.

Das Allradfahrzeug (4WD) erforderte einen deutlich höheren Entwicklungsaufwand zur Abstimmung der Fahrwerkregelsysteme. Es wurde deshalb erst im Juli 2011 für die Aufnahme in den Erprobungsbetrieb fertiggestellt.

Die ausgewählten Erprobungsteilnehmer stammten aufgrund des Prototyp-Charakters der Fahrzeuge ausschließlich aus dem Kreis der Mitarbeiter von Porsche. Sie mussten bestimmte Voraussetzungen erfüllen um an der Erprobung teilnehmen zu können. Aufgrund der begrenzten Reichweite durfte die einfache Wegstrecke nach Hause eine Entfernung von 120 km nicht überschreiten und es musste zu Hause ein Zugang zu einer Schuko Steckdose vorhanden sein um das Fahrzeug über Nacht wieder aufladen zu können (Ladedauer ca. 8 Stunden). Wenn keine Lademöglichkeit zu Hause bestand, dann durfte die einfache Wegstrecke nicht länger als 50 km sein um auch ohne Nachladen wieder in die Firma zu gelangen. Tagsüber wurden die Fahrzeuge wieder in der Firma aufgeladen und möglichst vollgeladen am Abend an den nächsten Erprobungsteilnehmer übergeben.

Die einzelnen Erprobungsteilnehmer erhielten jeweils nach Feierabend das vollgeladene Fahrzeug und nutzten auf ihrer Heimfahrt durch Umwege nach Möglichkeit die gesamte Reichweite. Zu Hause wurde über Nacht die Batterie wieder geladen und am Morgen das Fahrzeug wieder in der Entwicklung abgeliefert. Tagsüber nutzten die Entwickler die Zeit für weitere Optimierung und Fehlerbehebungen, wobei auch wieder mehr oder weniger kurze Fahrten durchgeführt wurden. Das Nutzungsverhalten der Fahrzeuge wurde somit hauptsächlich vom Entwicklungsablauf und weniger vom „Kunden“ bestimmt.

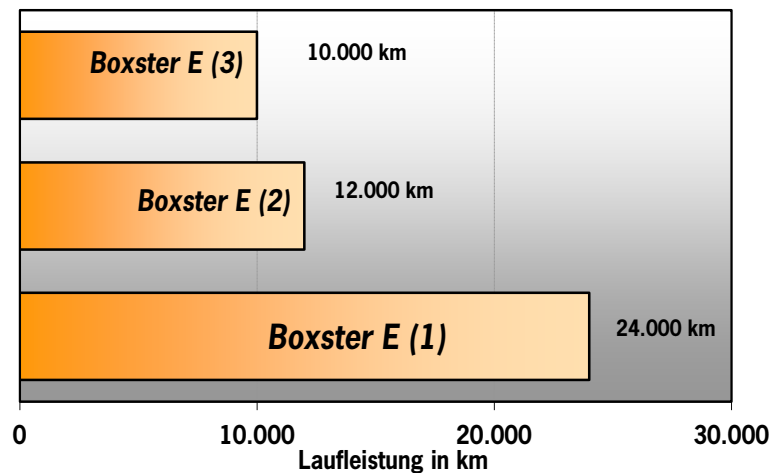
Die Messung und Aufzeichnung von fahrdynamischen Werten (Geschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigung, Gierrate, Lenkradwinkel, Raddrehzahlen, Fahrpedalstellung Bremspedalkraft, Radmomente und generatorisches Bremsmoment) erlaubte es Fahrprofile zu analysieren und die Auslegung der Fahrdynamiksysteme und der Betriebsstrategien an den elektrifizierten Antrieb anzupassen.

Darüber hinaus lieferte die Datenerfassung Informationen über den technischen Reifegrad der Fahrzeugkomponenten. Die wesentlichen Bauteile wie Elektromotor, Batterie, Leistungselektronik, Hydroaggregat, elektromechanische Servolenkung und Klimaanlage wurden durch Temperaturmessungen sowie Strom- und Spannungsmessungen überwacht.

## 2.1.4. Erprobungsergebnisse

### Nutzungsverhalten

Von März 2011 bis Februar 2012 haben die drei Elektrofahrzeuge eine Gesamtstrecke von 46.000 km zurückgelegt.



**Abbildung 8: Boxster e - Laufleistung (Stand: Feb. 2012)**

Wie in Abbildung 8 dargestellt, wurde ein Großteil der Erprobungskilometer mit dem Boxster e (1) zurückgelegt. Das intern „EBo1“ bezeichnete Fahrzeug konnte aufgrund des hohen Entwicklungsstandes am meisten in der Erprobung eingesetzt werden. Die geringere Kilometerleistungen beim Allradfahrzeug (EBo2) ist auf den höheren Entwicklungsaufwand zurückzuführen, der EBo3 wurde als Showcar für öffentliche Veranstaltungen (z.B. IAA Frankfurt, Challenge Bibendum Berlin, Paul Pitsch Classic, Konferenz Elektromobilität Berlin, Elektromobiler Jahresauftakt Ludwigsburg,...) eingesetzt und stand damit nicht so häufig für die Erprobung zur Verfügung.

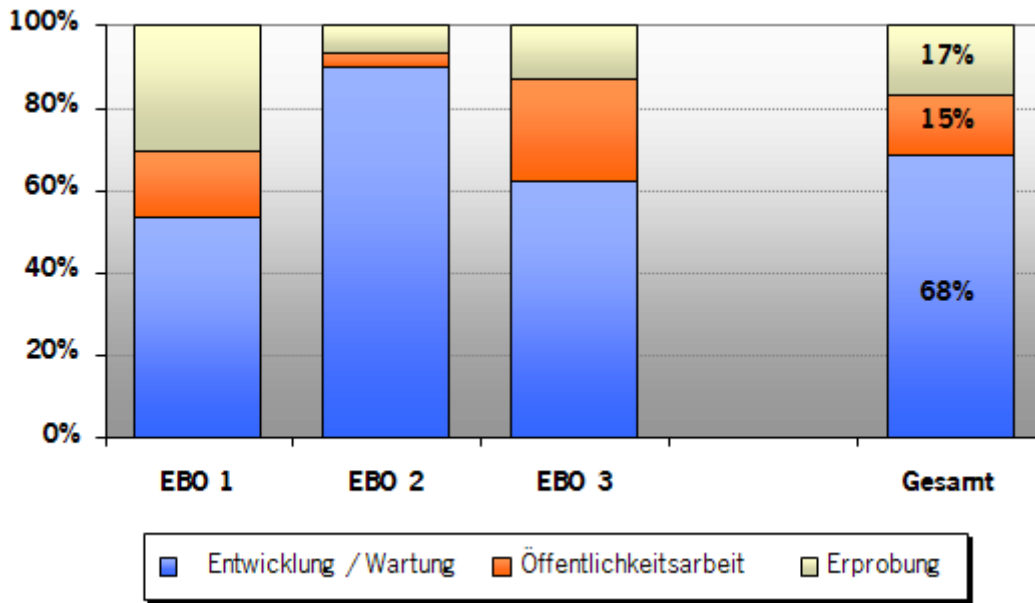


Abbildung 9: Verwendungsübersicht Boxster e

Die zeitliche Verwendung der einzelnen Fahrzeuge ist in Abbildung 9 veranschaulicht. Dabei wird zwischen drei Verwendungsarten (Entwicklung/Wartung, Erprobung und Öffentlichkeitsarbeit) unterschieden. Zu Werkstattaufenthalten zählen turnusmäßige Servicetermine, die ca. alle 2000 km durchgeführt wurden um die Sicherheit der Fahrzeuge zu überprüfen und zu gewährleisten. Dabei wurde unter anderem die Traktionsbatterie ausgebaut, geöffnet und einer genauen Überprüfung unterzogen. Ein Servicetermin nahm jeweils einen Zeitraum von einer Woche ein.

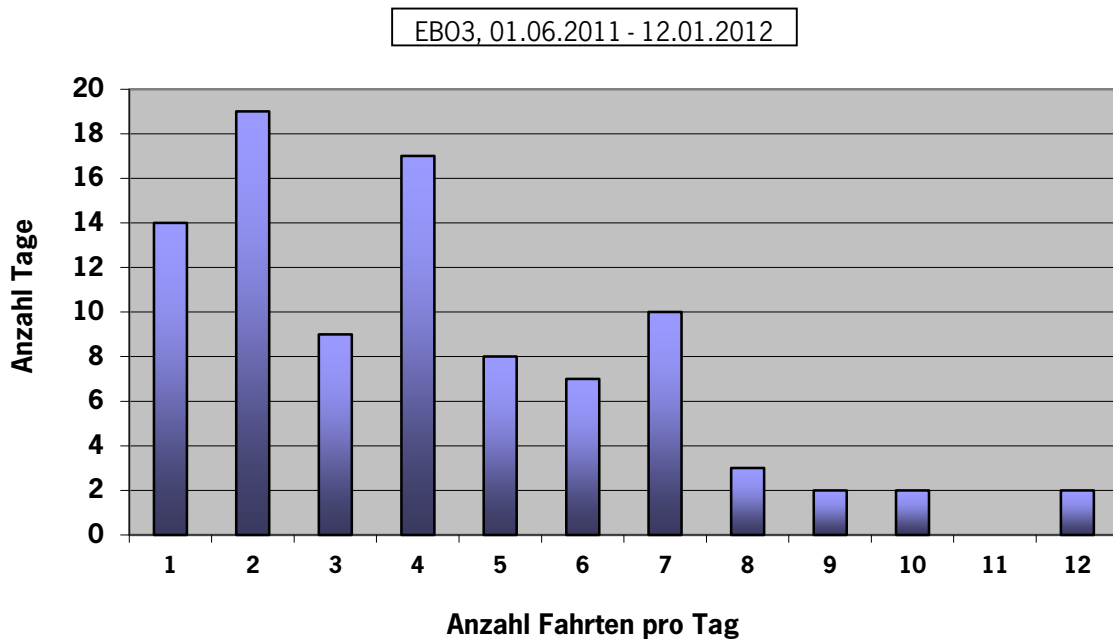
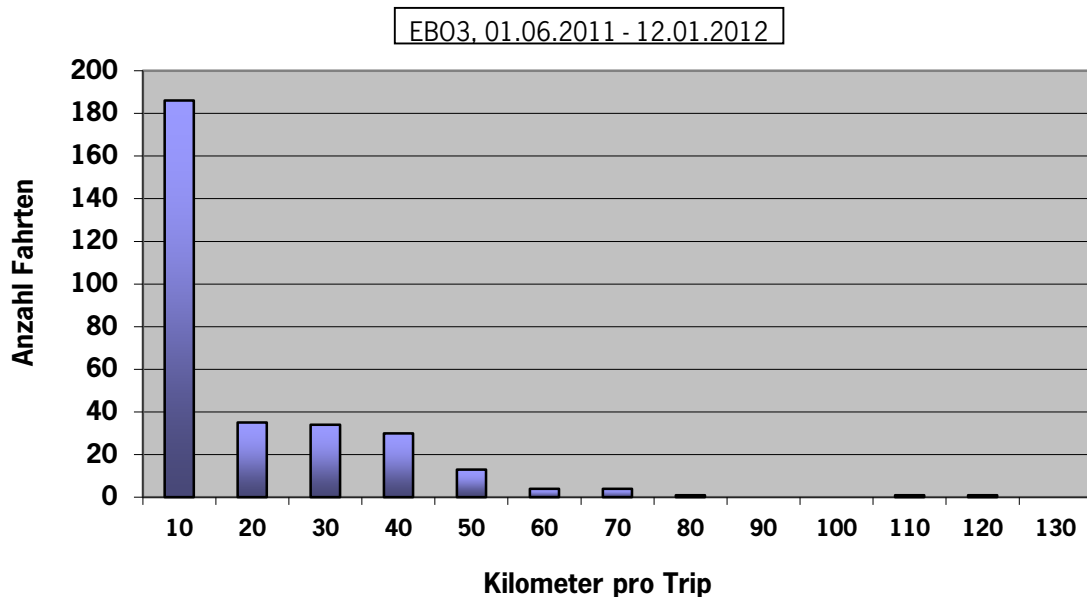


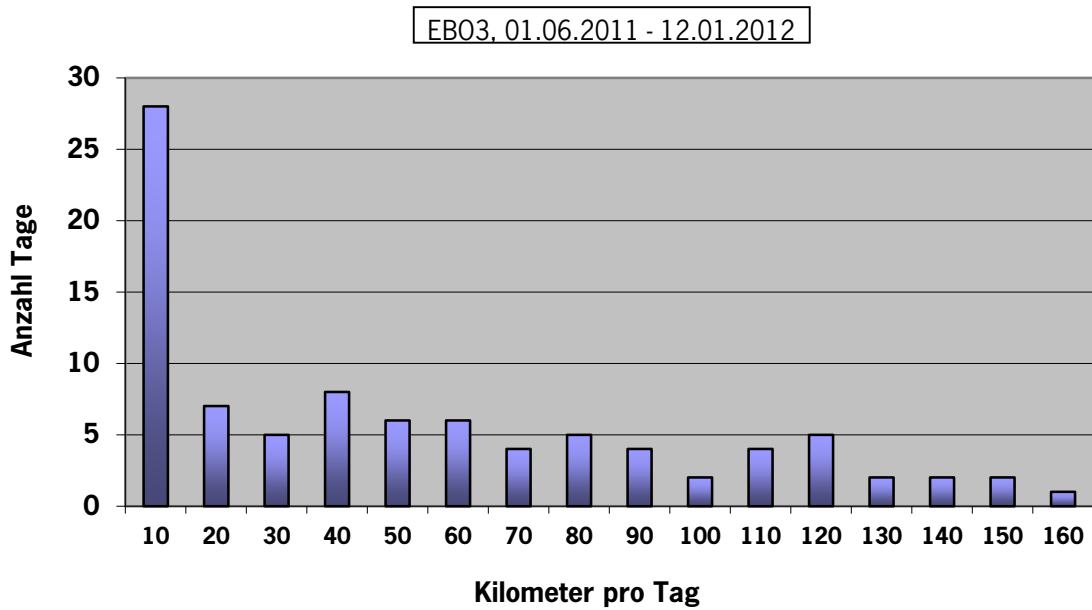
Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung: Anzahl Fahrten pro Tag

Abbildung 10 zeigt eine Auswertung, wie viele Fahrten pro Tag mit dem Fahrzeug vorgenommen wurden. Der häufigste Fall von 2 Fahrten pro Tag entspricht dem regulären Erprobungsablauf. Eine Fahrt von zu Hause in die Firma, tagsüber laden und am Abend wieder nach Hause. Abweichend davon weisen die häufigeren Fahrten pro Tag auf Fahrevents oder Fahrten im Rahmen der Erprobung und Weiterentwicklung hin. Fahrten mit weniger als einem Kilometer wurden ausgeblendet, dabei handelt es sich vor allem um Fahrzeugbewegungen innerhalb des Werksgeländes und der Werkstätten.



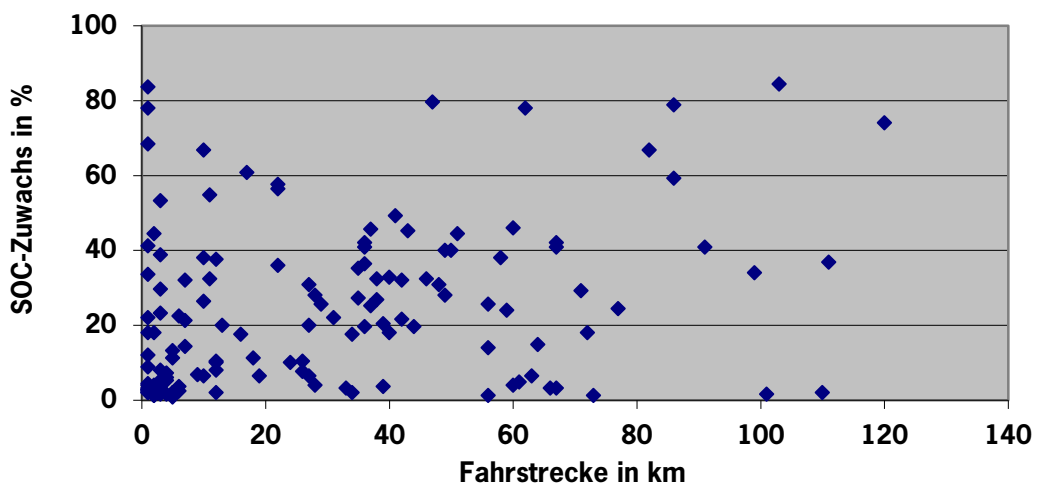
**Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung: Fahrtstrecke in Kilometer pro Trip**

Abbildung 11 zeigt die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Trip-Längen. Die größte Anzahl der Fahrten betrug weniger als 10 km. Relativ häufig wurden auch einzelne Fahrtstrecken von 20 bis 50 Kilometer zurückgelegt. Nur in sehr wenigen Fällen wurde bis knapp an die mögliche Reichweite des Fahrzeuges gefahren. Dies spiegelt den Sachverhalt wider, dass die Erprobungsteilnehmer, die das Fahrzeug meist nur einen Tag oder übers Wochenende zur Verfügung hatten, die mögliche Reichweite nicht immer voll ausschöpften.



**Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung: Fahrtstrecke in Kilometer pro Tag**

Abbildung 12 zeigt die Häufigkeitsverteilung der gefahrenen Tageskilometer. Der Großteil der Tage mit Fahrtstrecken bis zu 10 Kilometer verteilt sich wieder auf Werkstattaufenthalte zwecks Weiterentwicklung. Ansonsten betragen die täglichen Fahrtstrecken bis zu 160 Kilometer, wobei die Fahrtstrecken über 120 Kilometer seltener vorkamen.

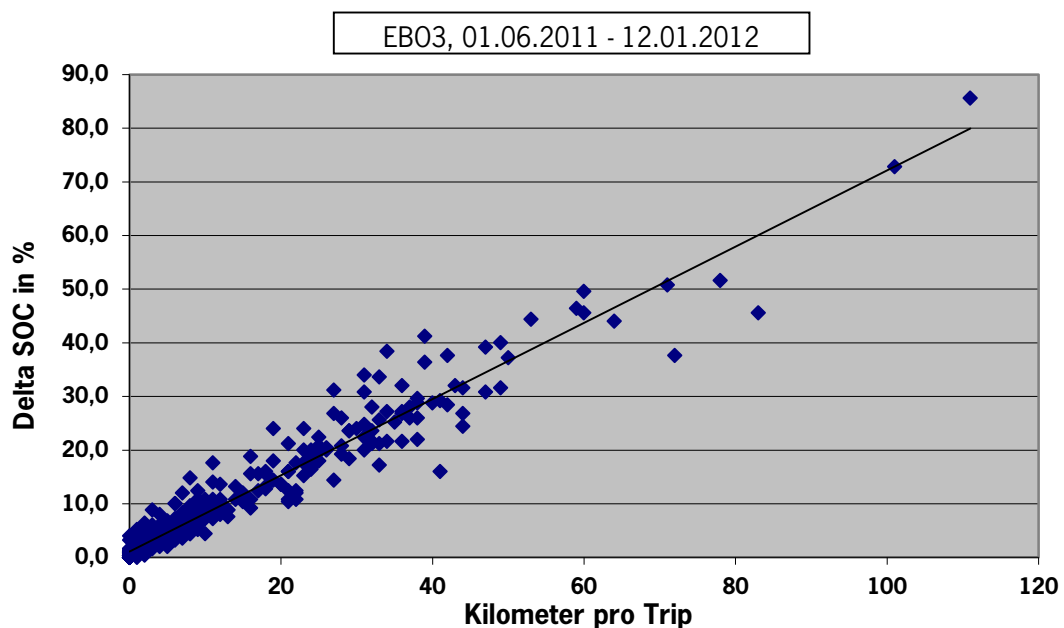


**Abbildung 13: Ladeverhalten: Fahrtstrecke zwischen zwei Ladevorgängen**



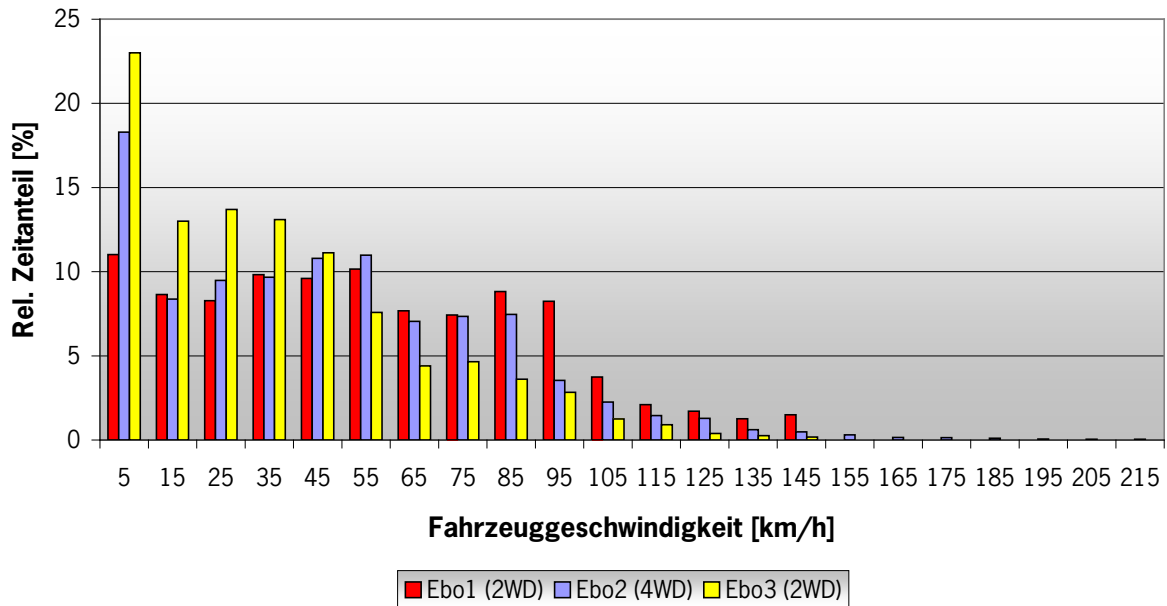
Interessant war auch die Beantwortung der Frage, wie viele Kilometer gefahren werden, bevor das Fahrzeug wieder geladen wird. Aus Abbildung 13 geht hervor, dass in nur 10 Fällen das Fahrzeug mehr als 80 Kilometer gefahren wurde bevor die HV-Batterie nachgeladen wurde. Die häufigsten Ladevorgänge fanden bereits nach sehr kurzen Fahrstrecken statt, wobei das Fahrzeug nicht immer vollgeladen wurde.

Im Prinzip wurde jede Möglichkeit genutzt, die Batterie wieder nachzuladen. Dieses Verhalten würde sich bei der Nutzung des Fahrzeuges durch nur eine Person sicherlich anders darstellen.



**Abbildung 14: Energieverbrauch pro Trip**

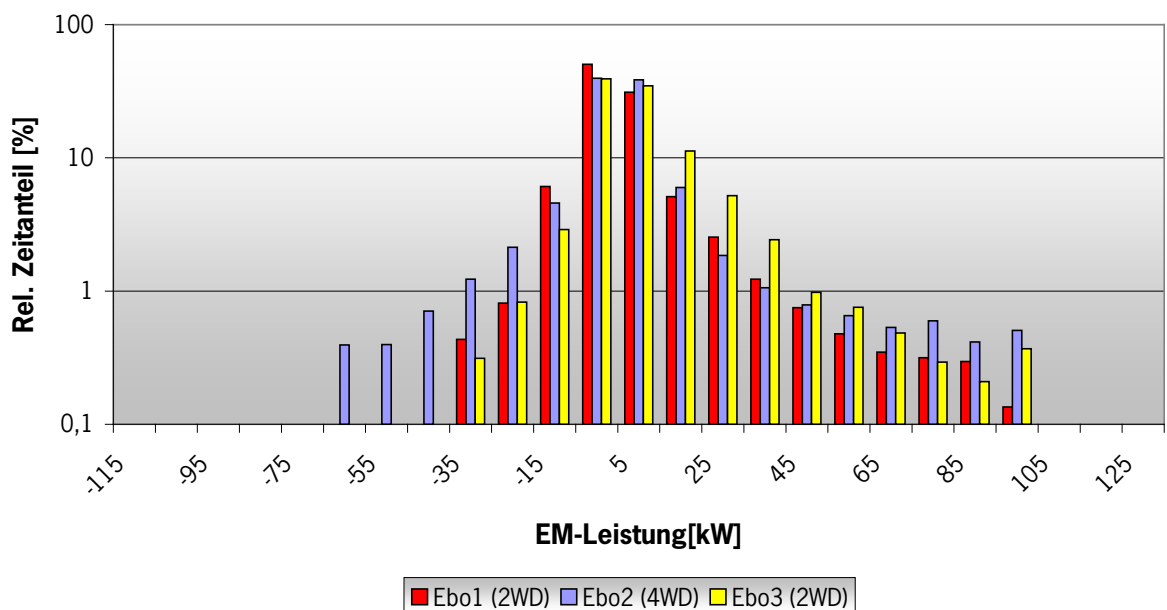
Abbildung 14 gibt einen Überblick über den SOC-Abfall für jede Fahrt in Abhängigkeit von der Fahrstrecke. 10% SOC entsprechen dabei einem Energieinhalt von 2,6 kWh. Im Durchschnitt betrug damit der Energieverbrauch (HV-Batterie-Straße) 182 Wh/km. Die relativ große Streubreite der Fahrten wird durch die Fahrweise, die Witterungseinflüsse und vor allem auch durch die topologischen Gegebenheiten (Höhenunterschied) bei den einzelnen Fahrten verursacht.



**Abbildung 15: Relative Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit im Alltagsbetrieb**

Abbildung 15 zeigt die relative Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeiten der drei Erprobungsfahrzeuge.

Überwiegend zeigt sich eine ähnliche Verteilung der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Bei Fahrzeug 3 fällt eine Häufung im Bereich geringere Fahrgeschwindigkeiten auf. Diese Häufung ist allerdings nicht aussagekräftig, da die Fahrzeuge im täglichen Betrieb beliebig bewegt wurden und kein definiertes Streckenprofil gefahren wurde.

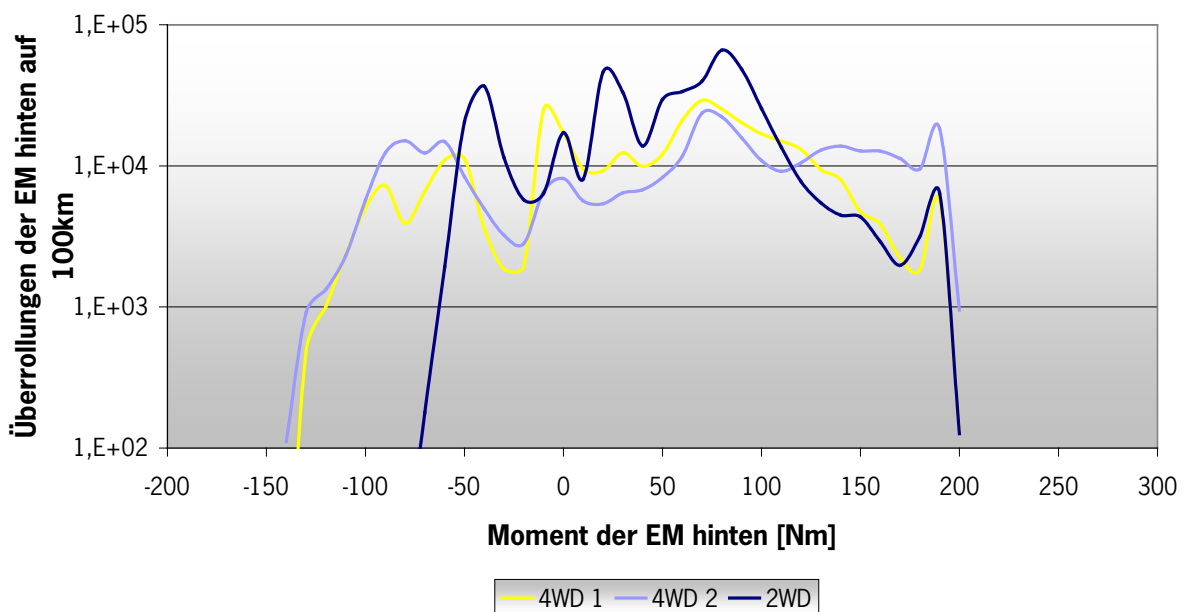


**Abbildung 16: Zeitklassierung der mechanischen Leistung der hinteren EM im Alltagsbetrieb**

Interessant erweist sich die Betrachtung der Leistungsbereiche der hinteren E-Maschine (EM) im Alltagsbetrieb (siehe Abbildung 16). Es zeigt, dass der Anteil an hohen Lasten (motorisch und generatorisch) sehr gering ist. Das bedeutet auch, dass der Fahrer diese Leistungen bzw. Momente selten angefordert hat. Dieser Effekt wird in der Darstellung durch die logarithmische Skalierung der Zeitachse visuell abgeschwächt. Außerdem ist erkennbar, dass beim Allradfahrzeug größere Leistungen zur Bremsenergie rückgewonnen werden (vgl. Abbildung 16).

Um die thermische und mechanische Belastung der EM sinnvoll analysieren und vergleichen zu können, wurden Fahrten auf dem hauseigenen Prüfgelände in Weissach durchgeführt. Während derartiger Fahrten wird das Fahrzeug in der Nähe der längs- und querdynamischen Limits bewegt um Verschleißerscheinungen und begrenzende Zustände bewusst herbeizuführen. Als Beispiel sei an dieser Stelle das Derating der EM genannt. Dabei handelt es sich um die Begrenzung der Leistungsaufnahme und Leistungsabgabe um einem Überhitzen vorzubeugen.

Aufgrund des hohen Leistungsumsatzes und der beschränkten Batteriekapazität dauern diese Fahrten nur einige Minuten, jedoch können die Ergebnisse extrapoliert werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf zwei Messfahrten mit einem 4WD-Fahrzeug und einer mit einem 2WD-Fahrzeug. Die Ergebnisse wurden zur Vergleichbarkeit jeweils auf 100 Kilometer hochgerechnet.



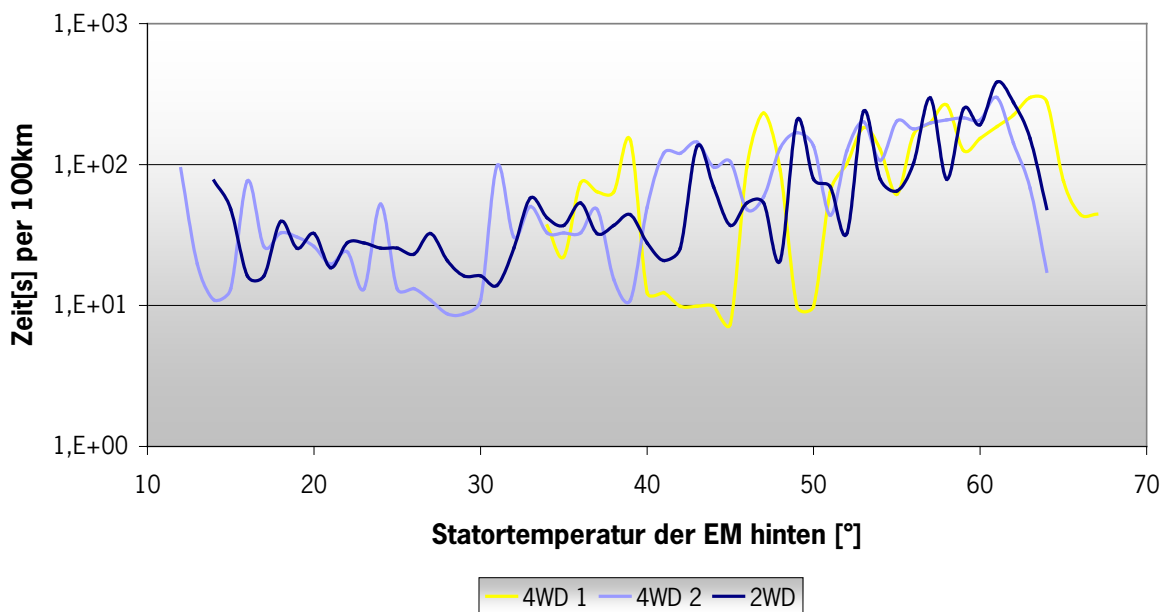
**Abbildung 17: Überrollungsklassierung des Moments der EM auf dem Prüfgelände**

Abbildung 17 zeigt eine Überrollungsklassierung. Derartige Klassierungen sind besonders hilfreich, da sich daraus sowohl die zeitliche Belastung der EM, als auch die Belastung der Verzahnungsstufen im Achsgetriebe anschaulich ableiten lassen. Eine Überrollung ist eine vollständige Umdrehung um 360°.

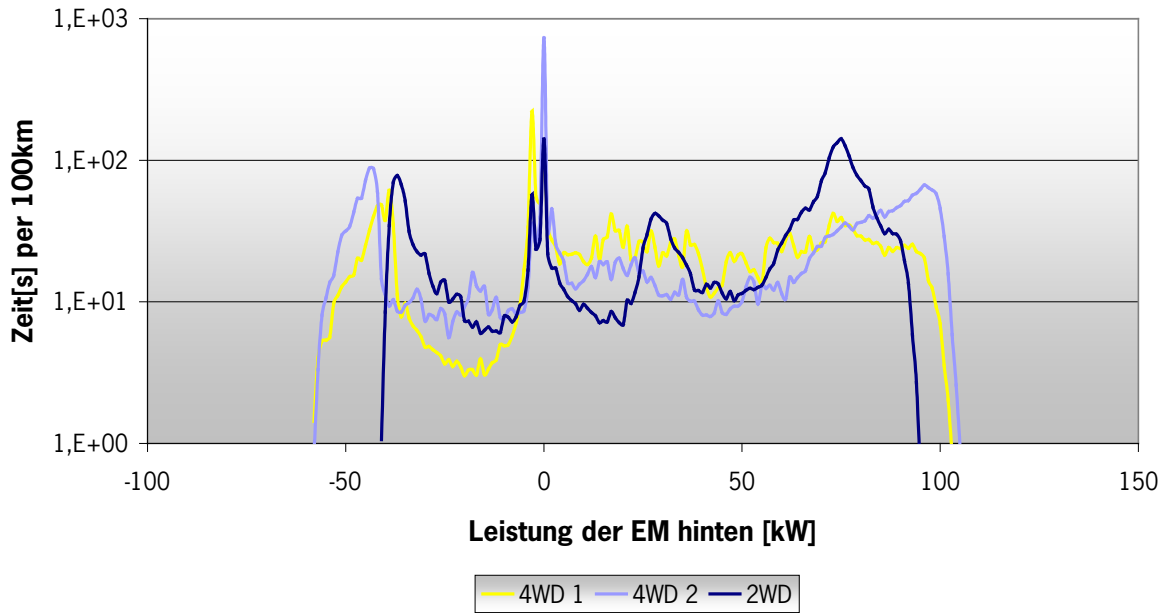
Besonders auffallend in dieser Grafik sind die geringen Rekuperationsmomente beim 2WD-Fahrzeug. Prinzipiell bietet ein 4WD-Fahrzeug, oder generell ein Fahrzeug mit Frontantrieb das größere Rekuperationspotenzial als ein heckgetriebenes Fahrzeug. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aus Gründen der Fahrstabilität (dynamische Radlastverteilung, Kraftschlusspotenzial an der Hinterachse), die Rekuperationsmomente bei einem heckbetriebenen Fahrzeug (früher) begrenzt werden müssen. Des Weiteren können bei einem 4WD-Fahrzeug die erforderlichen Leistungen im motorischen und generatorischen Betrieb auf beide E-Antriebe verteilt werden. Gleiche Fahrzyklen für 2WD- und 4WD-Fahrzeug vorausgesetzt, ergeben sich hieraus geringere (thermische) Belastungen der Antriebskomponenten und somit eine Erhöhung des zum Beispiel thermisch begrenzten Rekuperationsvermögens.

In Abbildung 17 dargestellte Unterschiede zwischen 2WD und 4WD können jedoch nur durch die Verteilung der motorischen Leistung begründet werden, da bei diesen Fahrzeugen nur über die Hinterachse rekuperiert wurde. In diesem Zusammenhang sind auch die höheren Belastungen bei Allradmessung 4WD-2 zu beachten. Dies kann hierdurch erklärt werden, dass bei den anderen Messungen 4WD-1 und 2WD das Moment bereits aufgrund der hohen EM-Temperatur begrenzt wurde.

Nachfolgende Abbildung 18 bestätigt die ausgesprochene Vermutung, dass die Temperatur der EM für Messung 2 mit dem Allradfahrzeug im Mittel hoch lag.

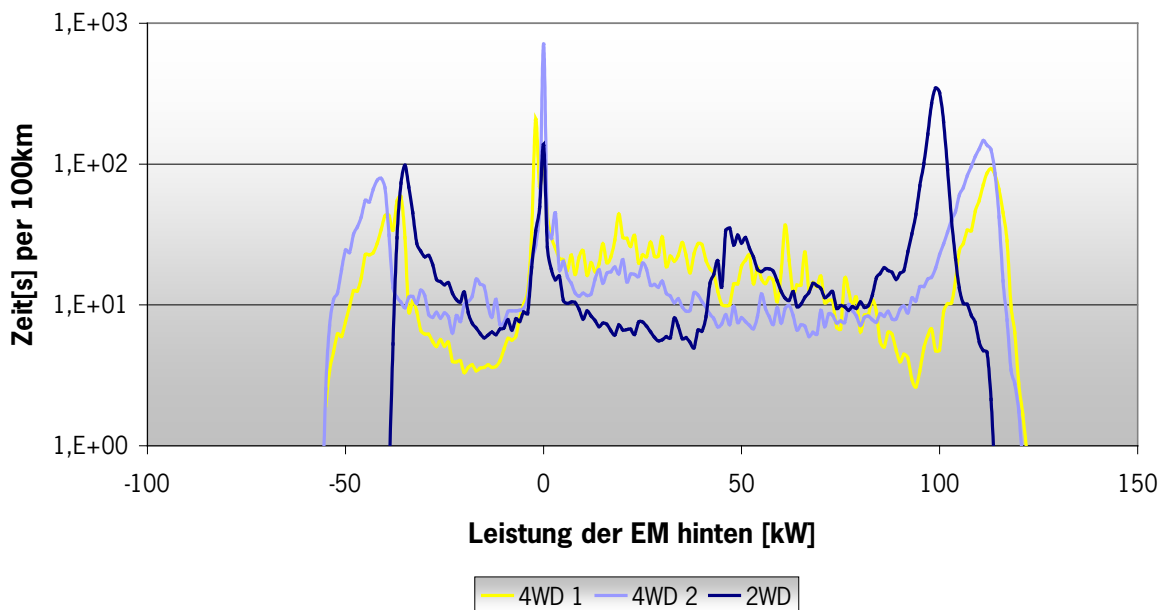


**Abbildung 18: Zeitklassierung der Statortemperaturen der EM auf dem Prüfgelände**



**Abbildung 19: Zeitklassierung der mechanischen Leistung der EM auf dem Prüfgelände**

Obige Abbildung 19 verdeutlicht im Wesentlichen die gewonnenen Erkenntnisse aus Abbildung 18. Es zeigten sich nur geringe Unterschiede in den maximal umgesetzten Momenten, jedoch deutliche Unterschiede im Anteil an Überrollungen in diesem Bereich. Des Weiteren ist in dieser Grafik eine Differenz in der Höhe der Spitzenleistungen zu erkennen. Da diese lokalen Extrema auch in der Momentendarstellung zu sehen sind, kann dieser Effekt nur auf unterschiedliche Geschwindigkeiten und damit Drehzahlbereiche zurückgeführt werden, da sich die mechanische Leistung aus Drehzahl und Drehmoment berechnet. Dieser Umstand ist klarerweise durch die Gesamtperformance der zwei unterschiedlichen Fahrzeugauslegungen gegeben.



**Abbildung 20: Zeitklassierung der elektrischen Leistung der EM auf dem Prüfgelände**

Aus Abbildung 19 und Abbildung 20 lassen sich die Wirkungsgrade der EM und des Pulswechselrichters herleiten. Diese stellen sich für den generatorischen Betrieb als erfreulich gut dar, da sich nur eine geringe Verschiebung der lokalen Extrema nach rechts im Bereich des negativen Moments erkennen lässt. Jedoch im motorischen Betrieb der EM zeigt sich eine größere Verschiebung und damit Verluste in größerem Ausmaß. Verlustleistung wird bei beiden Betriebsarten vollständig in Wärme umgewandelt und kann sich schädigend auf das Bauteil auswirken.

EM sind nicht die einzigen Quellen für Verluste beim Beschleunigen oder Verzögern eines Fahrzeugs. Es gibt elektrische Verbraucher wie den Zuheizung, den Klimakompressor und das Bordnetz sowie Reibungswiderstände im Antriebsstrang und Fahrwiderstände wie Luft-, Roll-, und Steigungswiderstand. Als besonders interessant erweist sich daher das Verhältnis zwischen der abgegebenen und aufgenommenen Energie an der Batterie während einer Messung. Dadurch kann analysiert werden, wie viel Energie zurückgewonnen und ein „zweites“ mal verwendet werden darf, um das Fahrzeug zu beschleunigen.

4WD 1	4WD 2	2WD
8,33%	10,19%	7,19%

**Tabelle 4: Anteile an rückgewonnener Energie auf PG**

Interessanterweise erweist sich der Anteil bei den 4WD-Messungen als höher, obwohl das Fahrzeug in der Lage ist, durch die zwei EM mehr Leistung motorisch umzusetzen. Grund hierfür könnte das in Abbildung 17 gezeigte geringe Rekuperationsmoment aufgrund der starken Beanspruchung der EM bei der 2WD-Messung sein.

#### Fahrzeugbeurteilung durch die Erprobungsteilnehmer

Neben der Führung eines Fahrtenbuches wurde von den Erprobungsteilnehmern ein Beurteilungsbogen ausgefüllt, in welchem subjektive Beurteilungen über das Fahrzeug bezüglich Antrieb, Fahrwerk, Klimaanlage/Karosserie, Elektrik und Akustik abgegeben wurden. Zudem bestand die Möglichkeit zu allgemeinen Themen wie Alltagstauglichkeit, Verkehrssicherheit, Beanstandungen, Anregungen etc. Kommentare abzugeben. Während des gesamten Erprobungszeitraums hatten ca. 250 Mitarbeiter die Möglichkeit die „Boxster e“ zu testen. Daraus konnten insgesamt ca. 100 detaillierte Beurteilungen gewonnen werden, welche zur stetigen Optimierung der Fahrzeuge herangezogen wurden.

Die Fahrzeugbeurteilungen wurde anhand des standardisierten **Porsche Bewertungsindex (PBI)** mit einem Notensystem von 0 bis 10 (übertrifft die Erwartungen) durchgeführt. Dabei wurden Einzelbeurteilungen mit einer Bewertung kleiner gleich „7“ als Beanstandung definiert. Mit Hilfe dieses Vorgehens war es möglich Problemfelder zu lokalisieren und, soweit im Rahmen des Projektes möglich, zu beheben.

Die folgende Abbildung 21 zeigt eine Übersicht der einzelnen Beurteilungskategorien und der zugehörigen Kriterien.

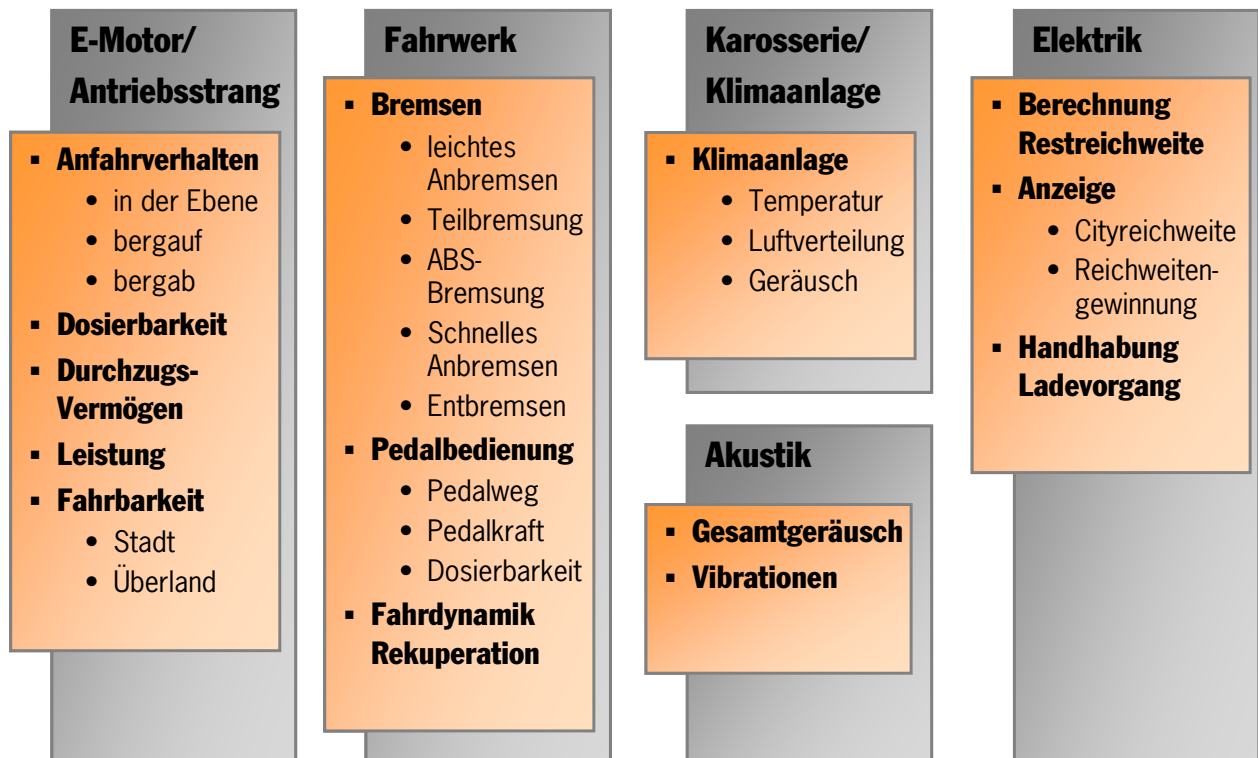


Abbildung 21: Beurteilungskategorien Feldversuch "Boxster e"

Aus den ersten 100 Beurteilungsbögen konnten die in Tabelle 5 dargestellten Durchschnittswerte ermittelt werden.

<u>Kategorie</u>		<u>PBI - Bewertung</u>
1.	elektr. Antrieb	7,69
2.	Fahrwerk	7,87
3.	Elektrik	7,41
4.	Karosserie / Klimaanlage	7,40
5.	Akustik	6,94
Ø-Bewertung		7,46

Tabelle 5: Fahrzeugbeurteilung Übersicht

Die Erprobungsteilnehmer attestieren dem Fahrzeug im Bereich des **Antriebs** durchschnittlich eine „gute“ Note und das Fahren mit dem Boxster e wurde oftmals als neuartiges Fahrerlebnis empfunden. Insbesondere im Stadtbetrieb konnte das Antriebskonzept nahezu durchweg überzeugen. Die Kritikpunkte beziehen sich zum Großteil auf die zu niedrig ausgelegte Leistung und das Durchzugsvermögen im Überlandverkehr bei den 2-WD Fahrzeugen.

In der Kategorie **Fahrwerk** haben die Fahrzeuge mit einer Bewertung von 7,87 ebenfalls eine „gute“ Note erzielt. Allerdings gab es einige Hinweise, dass die Abstimmung von Rekuperation und Bremsanlage weiter optimiert werden muss.

Im Bereich **Elektrik** wurde von den Erprobungsteilnehmern das Anzeigekonzept und die Bedienlogik des Boxster e gelobt. In Hinblick auf die geringe Reichweite der Elektrofahrzeuge wird vor allem der Reichweitenmanager zum Reichweitengewinn positiv hervorgehoben. Während der Erprobung zeigte sich jedoch auch, dass die Handhabung des Ladekabels häufig als unangenehm und lästig empfunden wurde. Eine Lösung des Problems für die Zukunft könnte das kontaktlose Laden per Induktion sein. Eine Umsetzung im laufenden Projekt war jedoch nicht geplant.

In der Kategorie **Karosserie/Klimaanlage** bestand die große Herausforderung der Elektrifizierung aller Aggregate des Heiz- und Kühlkreislaufes. Dahingehend haben sich während des Feldversuchs die Schwierigkeiten dieses umfangreichen Wandels herausgestellt. Es zeigte sich eine insgesamt niedrigere Heizleistung des Boxster e im Vergleich zum Serienfahrzeug. Zudem monierten die Erprobungsteilnehmer regelmäßig den hohen Einfluss der Klimaanlage auf die Gesamtreichweite sowie die Geräusentwicklung, welche durch das lautlose Fahren in besonderem Maße in den Vordergrund gerät.

Bezüglich des **akustischen Eindrucks** wurde vor allem das Erlebnis „lautloses Fahren“ als äußerst angenehm hervorgehoben. Als Folge des fehlenden Motorengeräusches drängen sich jedoch andere Nebengeräusche als störend in den Vordergrund. Die Möglichkeit der Aktivierung des Active-Sound-Design Systems (ASD) zur Störgeräuschüberlagerung wurde dennoch zumeist nicht vorgenommen. Das Sound-System wirkte auf die Erprobungsteilnehmer zumeist synthetisch, nicht authentisch und störend. Aufgrund der sehr dezenten Bedatung des Soundsystems wurde die bislang gewohnte Emotionalität vermisst. Die Funktion der Fußgängerwarnung wurde jedoch als notwendig erachtet, sodass eine Aktivierung des ASD im Stadtverkehr zur Wahrung der Verkehrssicherheit befürwortet und oftmals vorgenommen wurde.

#### Erkenntnisse für weitere Projekte

Im Rahmen der Felderprobung haben sich folgende Themen herauskristallisiert, die in Folgeprojekten weiter bearbeitet werden sollten:

##### Akustik:

- Weitere Sound Optimierung erforderlich (UNO-Richtlinie ab Sommer 2011)
- Akustisches Signal für den Startvorgang auch bei abgeschaltetem Sound realisieren



#### Antrieb:

- Rückwärts Anfahren am Berg mit 4WD zu optimieren, negatives Moment an der Vorderachse ermöglichen.
- Anfahren in steilem Gelände zu optimieren, Hänger Betrieb nicht möglich
- Leistungselektronik passt nicht zur Spannungslage der Batterie. Neue Leistungselektronik erforderlich
- Zulässige Stromgrenzen werden gelegentlich überschritten, dadurch Ausfall der Fahrbereitschaft, Anpassungen erforderlich
- Rekuperation bei voller Batterie nicht möglich: Rekuperationsmoment könnte durch Bremse simuliert werden
- Wählhebel kann während der Fahrt in Rückwärtsgang geschaltet werden, dadurch Fehlermeldung mit Wegnahme der Fahrbereitschaft, Sperre realisieren
- Rekuperationsstufen wirken sich auch bei getretenem Fahrpedal auf das Motormoment aus, Änderung erforderlich
- Beölung, Getriebe an der VA, Geräusche
- Bei >120 km/h Drehmomentschwingungen, weitere Optimierung der Phasenabstimmung erforderlich

#### Anzeigen:

- Reichweitenmanager Verknüpfung mit Navi, Anzeige der Ladestationen
- Car-PC, Anzeige dauert zu lange bis Bild erscheint
- Anzeige Stadtreichweite überflüssig
- Automatische Ladeerkennung und Umschaltung des Display zwischen Laden und Fahren noch nicht umgesetzt

#### Batterie:

- Bei komplett entleerter Batterie lässt sich der Ladevorgang nicht stabil starten, Optimierung erforderlich
- Ladevorgänge noch nicht stabil, weitere Optimierung erforderlich
- SOC-Bestimmung funktioniert noch nicht zuverlässig

#### Elektrik:

- Zu hoher Ruhestrom bei abgestelltem Fahrzeug kann zur Entleerung des Bordnetzes führen
- Unterbringung des Ladekabels im Fahrzeug optimieren
- Bidirektionale on board unit zum Laden
- Abrechnung über Ladestationen
- Schnellladegerät mit 22 kW

#### Fahrwerk:

- Ersatz des Wählhebels für mehr Platz in der Mittelkonsole
- Parksperre fehlt

#### Klimatisierung, Kühlung:

- Geräuschübertragung von Wasserpumpen und Klimakompressor vermindern
- Vorkonditionierung on grid noch nicht umgesetzt

#### 2.1.5. Wartung und Service der Fahrzeuge

In regelmäßigen Intervallen von ca. 2000 km wurden alle Fahrzeuge einer Revision unterzogen.

Folgende Sichtprüfungen wurden dabei vorgenommen:

- Engstelle Kühlwasserleitung EM hinten
- Engstelle Aggregatelagerung hinten
- Aggregatelagerung EM
- Querträger HA (Anbindung Drehmomentstütze)
- Rückleitung PSM-Hydroaggregat zum Behälter
- Unterdruckleitungen, -ventile und elektrische Verkabelungen der ESP Pumpen.
- Regelsysteme - Bremspedalwegsensoren (Sensor und Magnet)
- Verschraubungen der Aggregate auf Festsitz prüfen
- Prüfen der HV Steckanschlüsse auf Korrosion
- Kühlkreisläufe auf Dichtheit prüfen

Im Rahmen der Revisionen wurde auch die komplette Batterie aus dem Fahrzeug ausgebaut und folgenden Kontrollen unterzogen:

- Funktion der Dichtungen gegen Wasser und Staub
- Überprüfung aller Verbindungen insbesondere Festigkeit der Schrauben
- Untersuchung auf Druck- und Scheuerstellen

Im Anschluss wurden alle Funktionen der Batterie kontrolliert. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Alterung der Zellen gelegt.

Zunächst wurde die Gesamtkapazität der Batterie ermittelt und mit den vorangegangenen Werten verglichen. Weiterhin wurde der elektrische Innenwiderstand für jeden Zellblock sowie das Verhalten der Einzelspannungen beim Laden und Entladen ermittelt. Ein erhöhter Innenwiderstand führt zu höheren Wärmeverlusten sowie reduzierter Energiemenge.

Die verwendete Zellchemie auf Basis von  $\text{LiFePO}_4$  erwies sich als sehr robust. Auch nach 25.000 gefahrenen Kilometern weist die Batterie kaum spürbare Verluste von Leistung und Energie und damit auch der Reichweite auf.

## 2.1.6. Energiemanagement

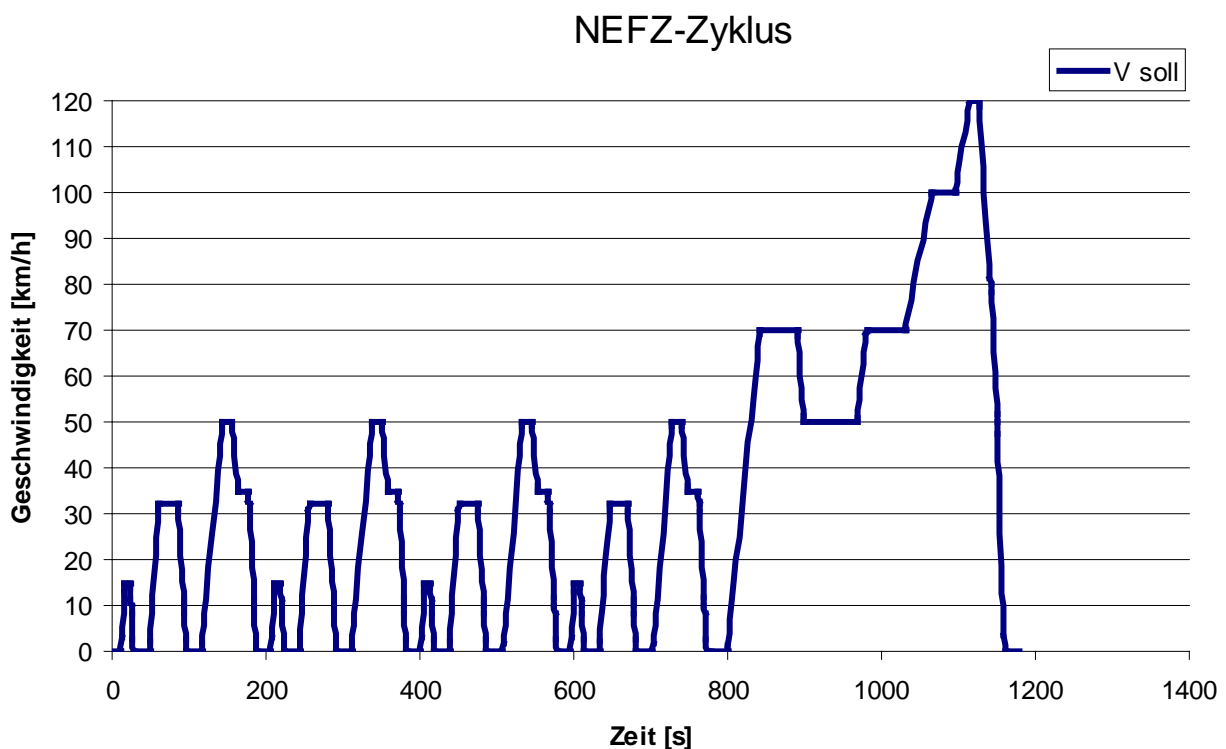
### Verbrauchsmessungen

Zur Analyse des Energieverbrauchs wurden Verbrauchsmessungen sowohl im NEFZ-Zyklus als auch im kundennahen Profil der Stuttgart-Runde durchgeführt. Als Versuchsträger diente jeweils der Boxster e 2WD mit einer elektrischen Maschine an der Hinterachse.

### NEFZ-Zyklus

Der Energieverbrauchstest wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Batterie vollgeladen (100% SOC)
- 2 x NEFZ-Zyklen in Folge (siehe Abbildung 22)
- Mittelung des Energiebedarfs über beide Zyklen
- Rechnerische Abschätzung der Ladebilanz



**Abbildung 22: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ-Zyklus**

## Verbrauch Traktion

Abbildung 23 stellt den Energieverbrauch für Traktion bilanziert an der elektrischen Maschine je Zyklus dar. Der durchschnittliche Verbrauch für Traktion im motorischen Betrieb liegt bei 152 Wh/km. Im Mittel konnten 27,7 Wh/km rekuperativ zurück gewonnen werden.

Hieraus resultiert ein effektiver Verbrauch für Traktion von 124 Wh/km im Mittel über beide Zyklen.

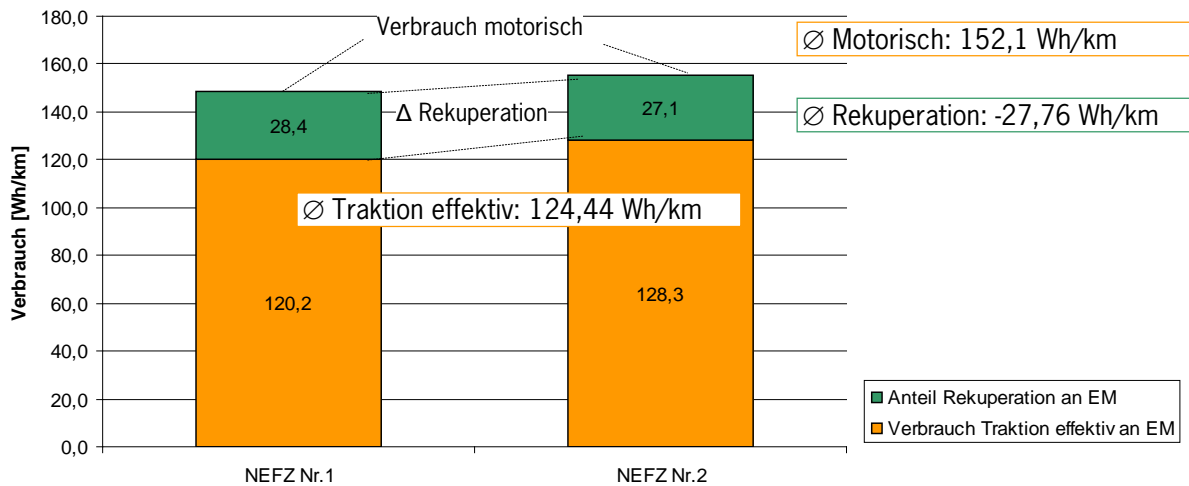


Abbildung 23: Energieverbrauch hinsichtlich Traktion bilanziert an der elektrischen Maschine

## Verbrauch Gesamtfahrzeug

Abbildung 24 zeigt die Energiebilanz des Gesamtfahrzeugs je Zyklus. Hierbei werden neben der elektrischen Maschine alle weiteren Nebenverbraucher berücksichtigt.

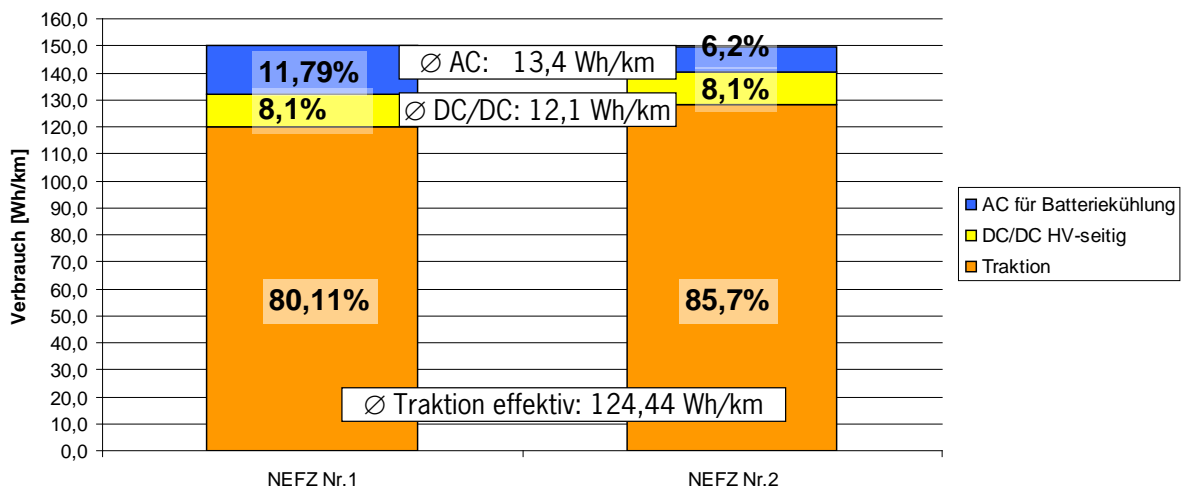


Abbildung 24: Energieverbrauch Gesamtfahrzeug

Zum Energieverbrauch für Traktion kommen weitere Anteile zur Versorgung des Bordnetzes (DC/DC-Wandler) und Klimakompressor (AC) hinzu. Diese betragen im Mittel über beide Zyklen 12,1 Wh/km für Bordnetz und 13,4 Wh/km zur Versorgung des Klimakompressors. Somit erhöht sich der Gesamtenergieverbrauch im Mittel auf 150 Wh/km.

Ursache für den Verbrauchsanteil des Klimakompressors ist eine aktive Kühlanforderung der Batterie.

Über den DC/DC-Wandler werden sämtliche 12-Volt Nebenverbraucher wie elektrische Unterdruckpumpe, Kühlerlüfter, interne Fahrzeugkommunikation etc. versorgt

### Rechnerische Abschätzung der Ladebilanz

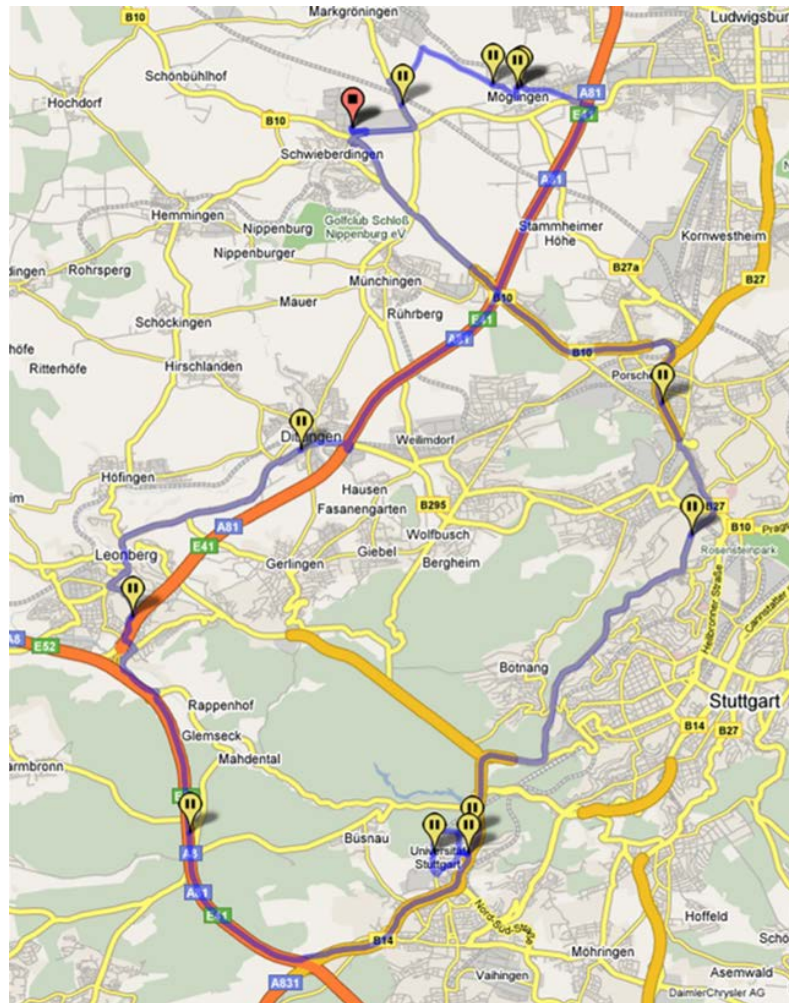
Da die Ladebilanz nicht mittels einer Messung quantifiziert werden konnte, erfolgt im Folgenden eine rechnerische Abschätzung.

### Berechnung Ladebilanz

- Energiebedarf im Fahrbetrieb aus beiden Zyklen gemittelt: 3,2 kWh
- Batterieverluste im Fahrbetrieb zusätzlich 0,2 kWh
- Annahme: 400 Watt Bordnetzbedarf analog Fahrbetrieb und 95% Wirkungsgrad des Ladegeräts
- Ladeleistung:  $230V \cdot 16A = 3,6kW$
- Effektive Ladeleistung 3,0 kW nach Abzug Bordnetzbedarf und Batterieverluste, entspricht 84% Wirkungsgrad der Ladebilanz
- Benötigte Ladeenergie an Steckdose: 4,1 kWh
- Somit beträgt der typisierungsrelevante Gesamtverbrauch nach ECE-101 Richtlinie nach Steckdose bezogen auf beide Zyklen 188Wh/km

### Kundennaher Verbrauch (Stuttgart-Runde)

Die Stuttgart-Runde weist eine Streckenlänge von insgesamt 64 Kilometern auf. Der Streckenverlauf weist sowohl einen Stadt- (30%), Überland- (26), Schnellstraßen- (18%) als auch Autobahnanteil (26%) auf (siehe Abbildung 25).



**Abbildung 25: Verlauf der Stuttgart-Runde**

Die Verbrauchsmessungen wurden mit drei Fahrweisen durchgeführt (vorausschauend, normal, sportlich), um auch den Einfluss des Fahrers auf den Energieverbrauch quantifizieren zu können. Vorausschauende Fahrweise bedeutet in diesem Zusammenhang eine sehr effiziente und schonende Fahrweise mit vielen Anteilen von „Segeln“. Eine normale Fahrweise ist durch moderate Beschleunigungen und Verzögerungen charakterisiert, wobei ein Mitschwimmen im Verkehr gewährleistet wird. Eine sportliche Fahrweise hingegen nutzt gerade aus Stopp-Phasen heraus das hohe verfügbare Anfahrmoment der elektrischen Maschine soweit es geltende Geschwindigkeitslimits erlaubt voll aus. Auch Verzögerungen werden wesentlich stärker und abrupter durchgeführt.

Insgesamt wurden 8 Verbrauchsrunden durchgeführt und ausgewertet. Da die Verbrauchsmessungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden, kann ebenfalls der Einfluss der Nebenverbraucher auf den Gesamtverbrauch innerhalb der aufgetretenen Außentemperaturen (15°C bis 30°C) quantifiziert werden. Hierzu wurde immer die Einstellung „Auto 22°C“ zur Klimatisierung vorgegeben.

Inhalte der Verbrauchsanalyse sind:

- Ermittlung eines kundennahen Verbrauchs im Realbetrieb
- Einfluss der Fahrweise
- Einfluss der Rekuperationsstrategie
- Einfluss der Komfort-Nebenverbraucher in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen

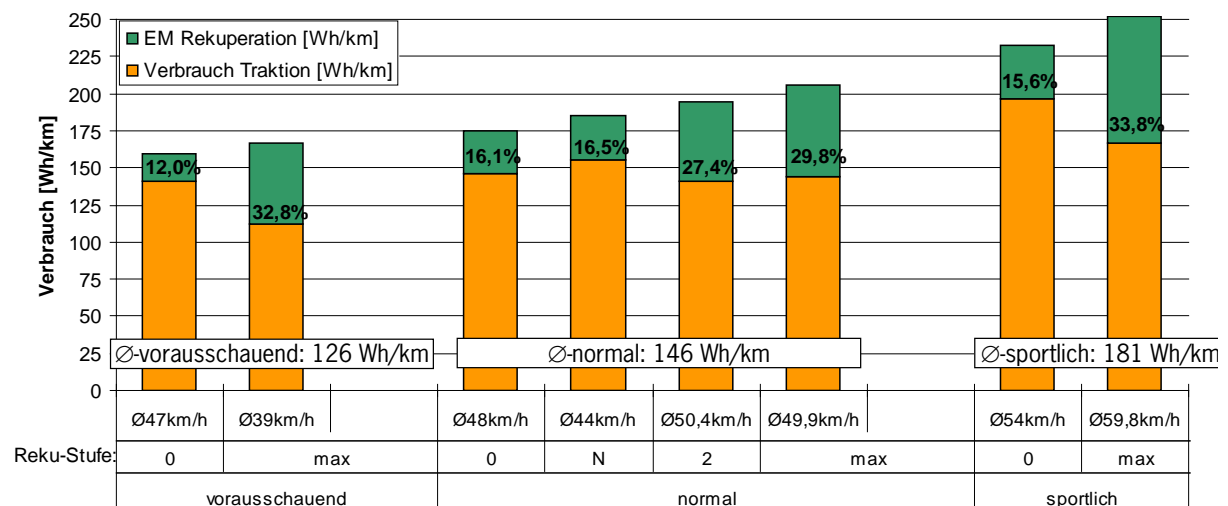
Tabelle 6 zeigt eine Übersicht über alle 8 Messfahrten:

	<b>Fahrertyp</b>	<b>Rekuperationsstufe</b>	<b>Außentemperatur [°C]</b>
Nr. 1	Vorausschauend	0	25
Nr. 2	Vorausschauend	Max	30
Nr. 3	Normal	0	23
Nr. 4	Normal	N	18
Nr. 5	Normal	2	17
Nr. 6	Normal	Max	15
Nr. 7	Sportlich	0	25
Nr. 8	Sportlich	Max	22

**Tabelle 6: Übersicht Verbrauchsmessungen Stuttgart-Runde**

Energieverbrauch Traktion:

Abbildung 26 stellt den Energieverbrauch für Traktion für alle 8 Messfahrten dar. In Abhängigkeit des Fahrstils variiert der durchschnittliche Energieverbrauch zwischen 126 Wh/km bei vorausschauender Fahrweise, 146 Wh/km bei normaler Fahrweise bis hin zu 181 Wh/km bei sportlicher Fahrweise.

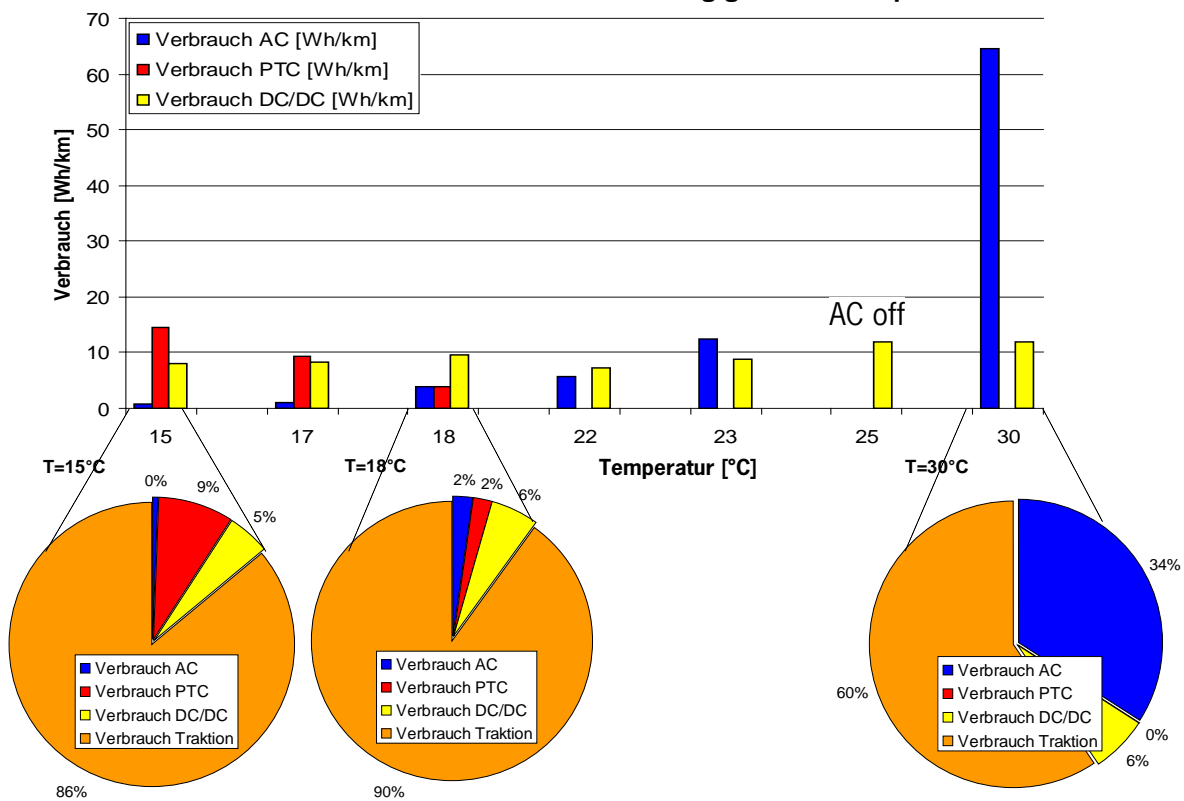


**Abbildung 26: Verbrauchsübersicht für Traktion bilanziert an der elektrischen Maschine**

Energieverbrauch für zusätzliche Nebenaggregate:

Abbildung 27 zeigt den zusätzlichen Energieverbrauch für Nebenaggregate (Klimakompressor, PTC-Heizung und DC/DC-Wandler) in Abhängigkeit der Außentemperatur zwischen 15°C und 30 °C. Darüber hinaus sind die Verbrauchsanteile am Gesamtverbrauch dargestellt. Bei einer Außentemperatur von 30°C beträgt der Anteil der Nebenaggregate am Gesamtverbrauch 40%. Auch erkennbar ist, dass ab 18°C die PTC-Heizung einsetzt. Dies beschreibt den so genannten „Reheat-Betrieb“. Im Temperaturbereich zwischen 18°C und 5°C muss zur Luftentfeuchtung die angesaugte Außenluft erst mittels Klimakompressor abgekühlt und anschließend mittels PTC-Heizung auf Zielinnenraumtemperatur aufgeheizt werden.

Der Bordnetzbedarf (DC/DC-Wandler) steigt leicht zu höheren Temperaturen, da mit höheren Temperaturen vor allem durch Kühlerlüfter ein höherer Leistungsbedarf entsteht.

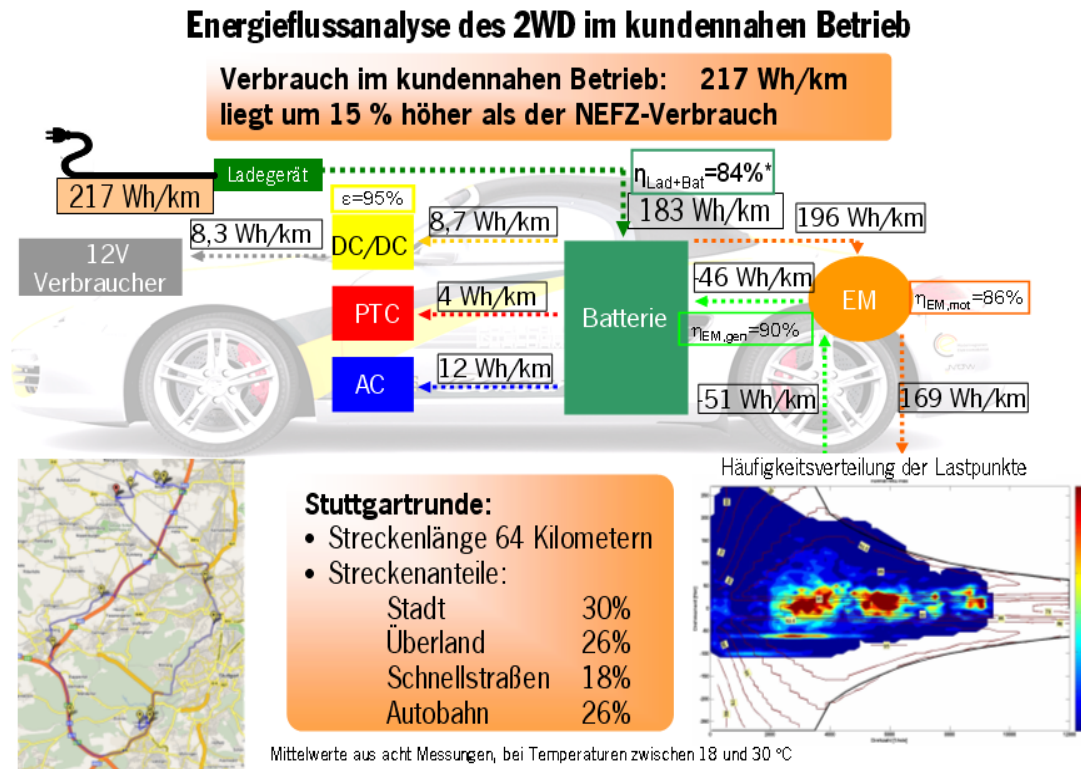


**Abbildung 27: Verbrauch der Nebenaggregate in Abhängigkeit der Außentemperatur**

Energieflussanalyse über alle Messfahrten gemittelt

Die jeweiligen Verbrauchsanteile für Traktion, Klimatisierung und Bordnetz wurden über alle 8 Messfahrten gemittelt und in Form einer Energieflussanalyse dargestellt. Diese sind Abbildung 28 zu entnehmen. Zudem wurden entsprechende Wirkungsgrade im motorischen und generatorischen Betrieb ermittelt.





**Abbildung 28: Energieflussanalyse über alle 8 Verbrauchsmessungen gemittelt**

Lastpunktverteilung der elektrischen Maschine

In den Abbildung 29 bis Abbildung 31 sind entsprechende Lastpunktverteilungen mit unterschiedlich gewählten Rekuperationsstufen dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass das maximal generatorisch mögliche Moment in Abhängigkeit der Rekuperationsstufe skaliert wird. Die Skalierung ist teilweise auch geschwindigkeitsabhängig. Die Skalierung des maximalen generatorischen Moments hat eine Verbrauchseinbuße bei Rekuperationsstufe 0-2 zur Folge. Applikativ sollte immer das maximal generatorische Moment unabhängig der gewählten Rekuperationsstufe zur Verfügung stehen.

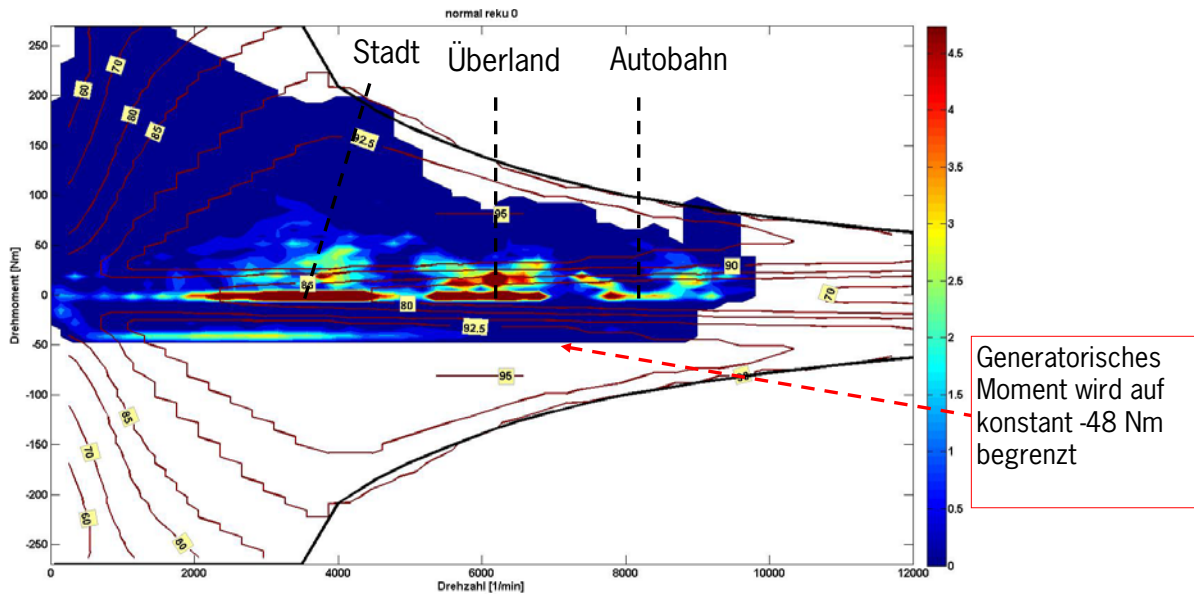


Abbildung 29: Lastpunktverteilung bei Rekuperationsstufe "0"

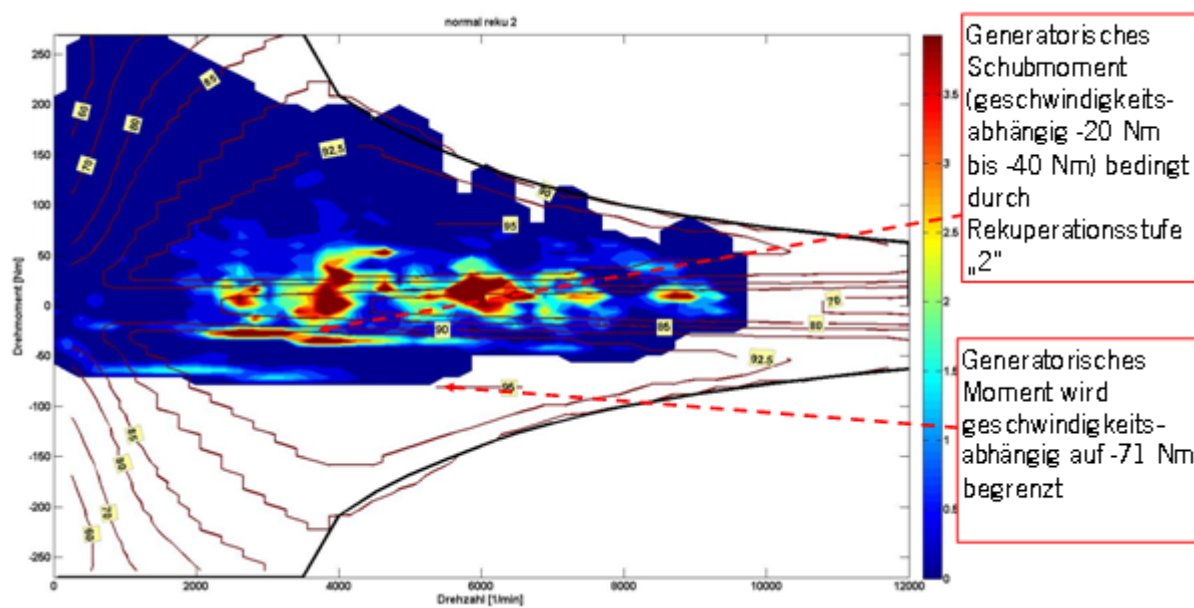
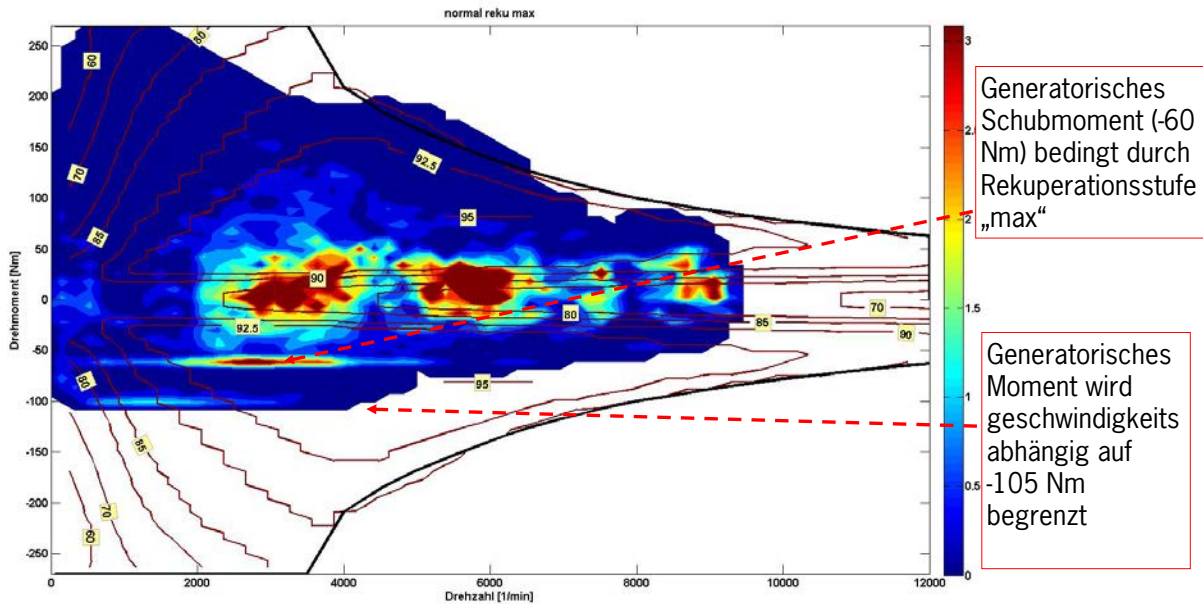
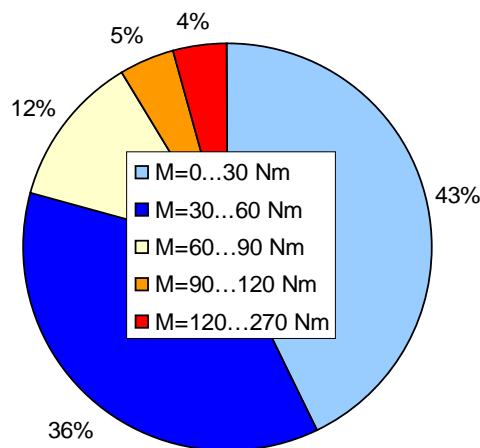


Abbildung 30: Lastpunktverteilung bei Rekuperationsstufe "2"

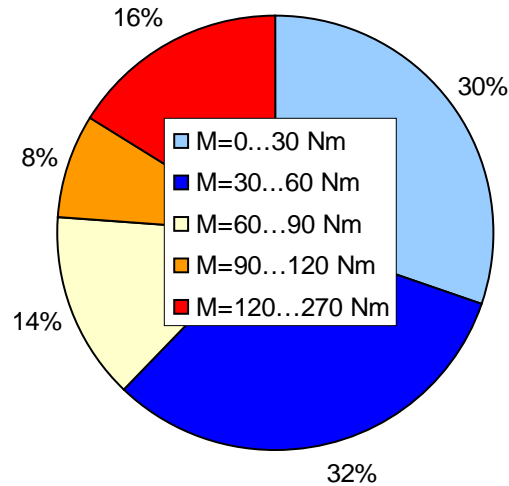


**Abbildung 31: Lastpunktverteilung bei Rekuperationsstufe "max"**

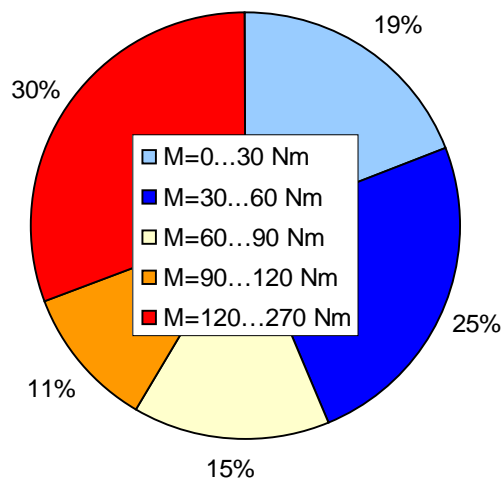
Mit Hilfe der dargestellten Lastpunktverteilungen wurde ebenfalls der Anteil der umgesetzten Energie im motorischen Betrieb in Abhängigkeit des geforderten Antriebsmoments untersucht (Abbildung 32 bis Abbildung 33). Hierbei ist ersichtlich, dass bei vorausschauender Fahrweise 80%, bei normaler Fahrweise immerhin noch 60% der Energie bei einem Antriebsmoment kleiner 60Nm abgegeben wird. Diese Erkenntnisse können bei künftigen Maschinenauslegungen genutzt werden (siehe Kapitel 2.6.2).



**Abbildung 32: Prozentuale Energieverteilung in Abhängigkeit des Lastmoments bei vorausschauender Fahrweise**



**Abbildung 33: Prozentuale Energieverteilung in Abhängigkeit des Lastmoments bei normaler Fahrweise**



**Abbildung 34: Prozentuale Energieverteilung in Abhängigkeit des Lastmoments bei sportlicher Fahrweise**

### Fazit für weitere Projekte

Seitens des Energiemanagements wird empfohlen, dass keine Abhängigkeit zwischen gewählter Rekuperationsstufe und maximal generatorischem Moment besteht. Durch eine Abhängigkeit kann bei vorausschauender Fahrweise in Rekuperationsstufe „0“, d.h. Segeln nicht das volle Verbrauchspotential genutzt werden, da die Rekuperation dann begrenzt wird.

Darüber hinaus geben die dargestellten Häufigkeitsverteilungen der Lastpunkte Anhaltspunkte für eine künftige Maschinenauslegung hinsichtlich einer Wirkungsgradoptimierung. Hierbei ist durch eine Wirkungsgradsteigerung im unteren Lastbereich ein erhebliches Verbrauchspotential zu erwarten.

## 2.2. Thermomanagement

### 2.2.1. Auslegung des Fahrzeug-Thermomanagements

Im Rahmen des Projekts konnten die für ein Elektroauto bestimmenden Abwärmen der relevanten Komponenten EM, Leistungselektronik und Batterie anhand der zur Verfügung stehenden Daten analysiert und in einem angepassten instationären Simulationsmodell bezüglich der zeitlichen Verläufe der Wärmeeinträge simuliert werden.

Mit Hilfe des Simulationsmodells ist es gelungen, ein für E-Autos geeignetes Kühlkonzept unter Berücksichtigung der praxisnahen Randbedingungen eines realen Fahrzeugs darzustellen.

### 2.2.2. Aufbau des Fahrzeug-Thermomanagements

Das Kühlsystem eines vollelektrischen Fahrzeugs unterscheidet sich fundamental von dem eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Das Kühlsystem gliedert sich im Wesentlichen in zwei Kreisläufe. Die Kühlung der EM und der Leistungselektronik erfolgt über den so genannten **Hochtemperatur-Kreislauf (HT)**. Dabei sind Leistungselektronik (PWR) und EM in Reihe geschaltet, da die Grenzwerte der Vorlauftemperatur zur Leistungselektronik niedriger sind als die der EM. Vorder- und Hinterachse dieser Antriebsblöcke sind parallel geschaltet. Parallel zu den Antriebsblöcken ist das Fahrzeug-feste Ladegerät (CHA) angeordnet.

Die Abwärme dieser Komponenten wird je nach Fahrsituation entweder zur Beheizung des Innenraums eingesetzt oder über die Wärmetauscher im Fahrzeugbug an die Umgebung abgegeben. Zur Sicherstellung der Innenraumbeheizung ist über ein Ventil die Möglichkeit eines Inselkreislaufs

dargestellt, in dem über eine separate Pumpe und einem elektrischen Zuheizter (PTC) unter Verwendung des bisher eingesetzten Klimageräts der Innenraum beheizt werden kann.

Die Kühlung der Batterie wird über den **Niedertemperatur-Kreislauf (NT)** sichergestellt. Dieser ist so aufgebaut, dass bei niedrigen Umgebungstemperaturen bzw. bei geringem Kühlbedarf der Batterie die Kühlung über einen Kühlmittel-Luft Wärmetauscher im Fahrzeugbug dargestellt wird. Die Regelung ist so appliziert, dass erst wenn dieser Wärmetauscher an die Leistungsgrenzen stößt, d.h. wenn die Vorlauftemperatur zur Batterie zu hoch wird, zur zusätzlichen Kühlung ein so genannter „Chiller“ eingebunden wird, über den zusätzlich Wärme über den Kältemittelkreislauf abgeführt wird. Da dies zusätzliche Antriebsleistung des elektrischen Klimakompressors zu Lasten der Fahrzeugreichweite erfordert, wurde der Kreislauf auf einen möglichst geringen Einsatz dieses Chillers hin optimiert.

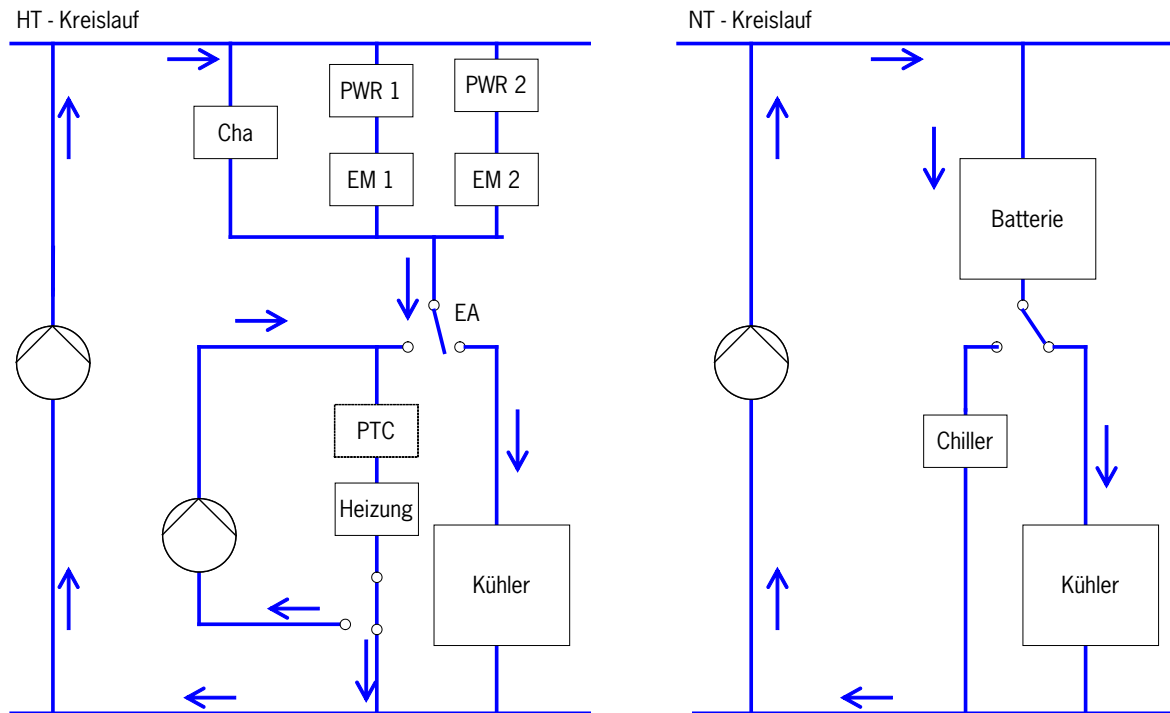


Abbildung 35: HT- und NT- Kreislauf

### 2.3. Akustik

Aus Sicht der Akustik/Schwingungstechnik hatte das Forschungsvorhaben Pilotprojekt „Boxster e“ folgende Schwerpunkte:

1. Geräuschanreicherung außen/innen (Active Sound Design)
2. Geräuschqualität/unerwünschte Störgeräusche
3. Schwingungskomfort/Karosseriezittern (Gesamtfahrzeug-Schwingungsverhalten)

#### 2.3.1. Geräuschanreicherung

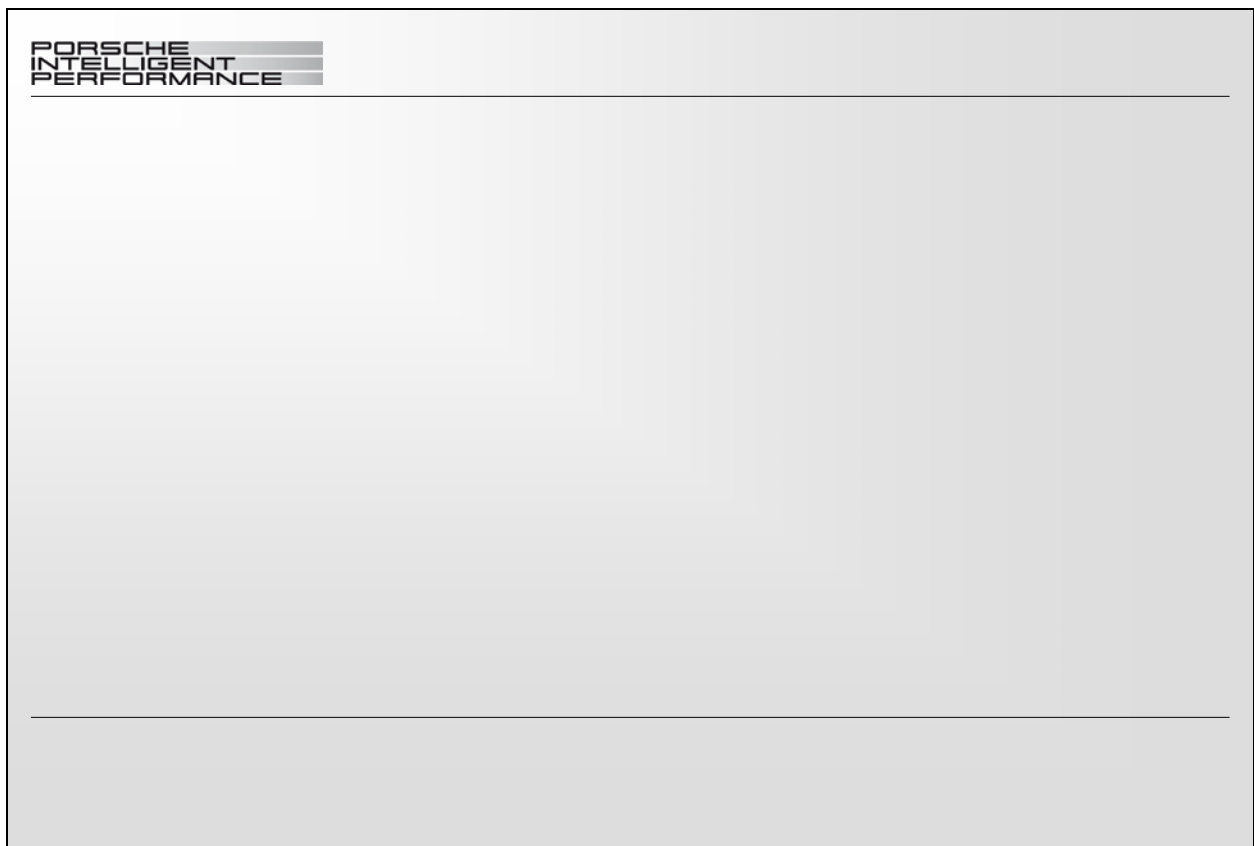
Elektrofahrzeuge sind bei den im Stadtverkehr typischen niedrigen Geschwindigkeiten von 30 km/h und weniger von außen akustisch kaum wahrnehmbar, was für Fußgänger und Radfahrer ein erhöhtes Gefährdungsrisiko ergeben könnte, wenn herannahende Fahrzeuge „überhört“ werden. Hierzu wurden im Rahmen des Vorhabens verschiedene Systeme zur Generierung eines synthetischen Fahrgeräuschs dargestellt und bewertet. Ziel war es dabei, die Sicherstellung der Wahrnehmbarkeit des Fahrzeugs für Fußgänger bei langsamer Fahrt durch einen Porsche typischen, emotionalen, aber nicht lästigen Außensound zu erreichen.

Im Gegensatz zu anderen, schon bekannten Anwendungen wurde neben der zur Fußgängerwarnung eingesetzten Außengeräuschanreicherung auch eine gezielte, zusätzliche Anreicherung des Innengeräusches vorgenommen, um damit dem Fahrer die Betriebsbereitschaft des Fahrzeugs zu signalisieren, eine akustische Rückmeldung über den Lastzustand zu geben sowie auftretende Störgeräusche zu maskieren.

Mit den umgesetzten Lösungen wurde insofern Neuland betreten, da hier erstmals ein auf Sample-Playern basierender Geräuschgenerator im Fahrzeug verwendet wurde, der so noch nicht am Markt erhältlich war und eigens für dieses Projekt realisiert wurde. Die ebenfalls untersuchte, auf frei definierten Zeitsignalen basierte, synthetische Signalerzeugung war zwar prinzipiell bereits von sportlichen Verbrennungsmotorfahrzeugen bekannt, Applikationen zur Innen- und Außengeräuschanregung in reinen Elektrofahrzeugen waren vorher jedoch nur vereinzelt vorgenommen worden. Die als dritte Variante zur Geräuscherzeugung geprüfte, auf harmonischen Oszillatoren basierende synthetische Signalerzeugung wurde bereits früher in Hybridfahrzeugen eingesetzt.

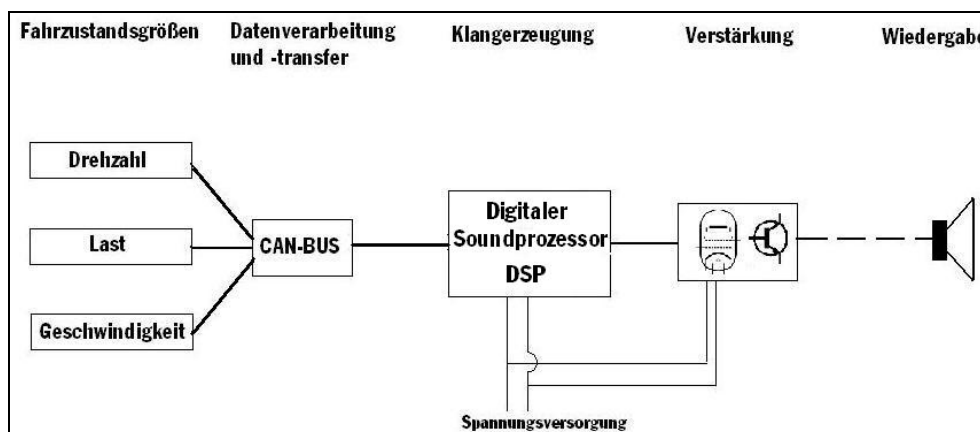
### Umsetzung

Die Übersichtsdarstellung Abbildung 36 zeigt die Umsetzung von ASD-Systemen.



**Abbildung 36: Ziele und untersuchte Varianten Active Sound Design**

Auch wenn die Soundgeneratoren der drei von unterschiedlichen Lieferanten dargestellten Prototyp-ASD-Systeme auf verschiedenen Signalerzeugungsprinzipien basieren, gibt es doch Gemeinsamkeiten bei der Signalverarbeitung, wie aus der nachfolgend dargestellten Übersicht in Abbildung 37 hervorgeht:



**Abbildung 37: Signalerzeugungsprinzip Active Sound Design**

Alle drei Systeme erzeugen sowohl außen als auch innen ein zusätzliches Geräusch, wobei zur Außengeräuschgenerierung generell ein im Fahrzeugheck nahe dem Traktionsmotor angeordneter Lautsprecher zum Einsatz kam. Für die Innengeräuschwiedergabe wurden je nach verwendetem System entweder die Lautsprecher des vorhandenen Audio-Systems (EBo2, EBo3) oder ein zusätzlich an der Trennwand zum Kofferraum hinten rechts angeordneter elektrodynamischer Schwingerreger (EBo1) verwendet. Dieser für die Anbringung des Shakers vorteilhafte Ort im Fahrzeug konnte durch Auswertung von vibroakustischen Übertragungsfunktionen im Rahmen von Voruntersuchungen identifiziert werden.

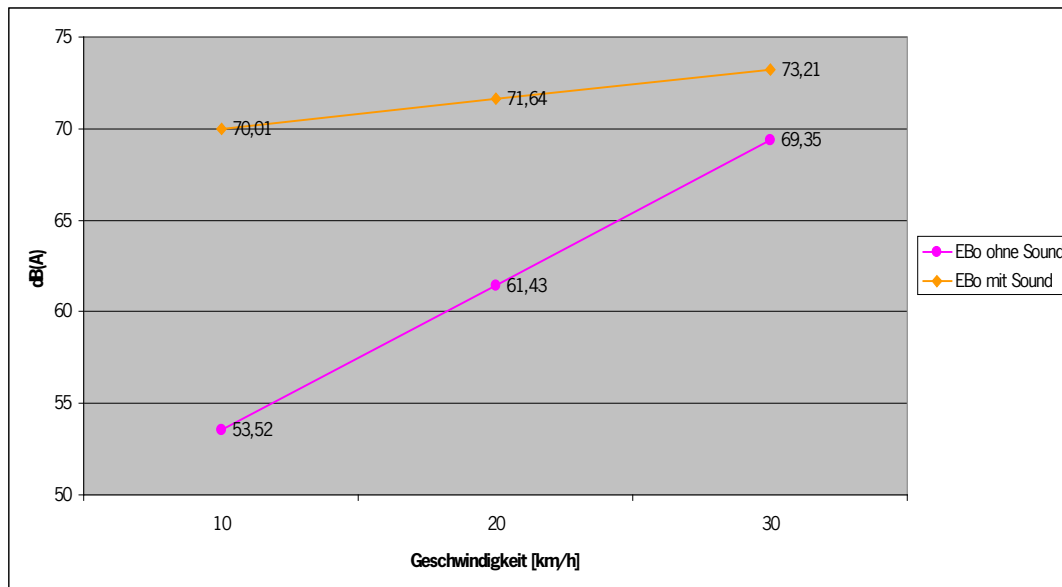
Die Frequenz des synthetischen Geräusches wird zur Darstellung des Fahrgeschwindigkeitseindrucks mit der Motordrehzahl moduliert, zusätzlich erfolgen eine Beimischung tieffrequenter Spektralanteile sowie eine Pegelanpassung bei steigender Last. Generell war es nicht das Ziel, die Fahrgeräusche eines Verbrennungsmotorfahrzeugs zu imitieren, es sollte vielmehr ein möglichst eigenständiges Maschinen-geräusch abgestrahlt werden.

#### Objektive Ergebnisse der Außengeräuschreicherung:

Mit dem EBo1 im Winter, d.h. bei einer Fahrbahntemperatur von  $-7,6^{\circ}\text{C}$  und einer Lufttemperatur von  $-5,1^{\circ}\text{C}$  mit Winterrädern durchgeführte Außengeräuschmessungen gemäß Richtlinie ECE R51 bzw. 70/157 EWG (beschleunigte Vorbeifahrt) zeigen, dass das Fahrzeug trotz der geschilderten ungünstigen Randbedingungen erwartungsgemäß ohne Probleme die gesetzlichen Grenzwerte (in diesem Falle 75 dB(A)) erfüllen konnte, der Typisierungswert liegt bei 70 dB(A) (gerundet). Wird das ASD-System aktiviert (mit der Erstbedatung), erhöht sich der Außengeräusch-Typisierungswert auf 72 dB(A) (gerundet) und verbessert damit die Wahrnehmbarkeit deutlich.



Wichtiger noch als bei diesen, für Fußgänger eher weniger relevanten Betriebsbedingungen, ist die Außengeräuschanreicherung bei niedriger Geschwindigkeit und Konstantfahrt. Die dabei mit dem EBo3 gemessenen Resultate sind der Abbildung 38 zu entnehmen.



**Abbildung 38: Außengeräuschemesswerte Porsche Boxster e mit und ohne Active Sound Design**

Es wird erkennbar, dass bei den im Stadtverkehr üblichen Fahrgeschwindigkeiten nur geringe Fahrgeräusche abgestrahlt werden, die leicht vom Hintergrundgeräusch maskiert werden können, was dazu führen kann, dass ein Elektrofahrzeug wie der Boxster e von Fußgängern schlichtweg überhört wird. Mit Hilfe des dargestellten ASD-Systems (hier exemplarisch im EBo3 untersucht) erfolgt eine Pegelanhebung um bis zu 17 dB bei geringer Geschwindigkeit, so dass eine eindeutige akustische Erkennbarkeit und Ortbarkeit des Fahrzeugs für Passanten gegeben ist.

### Subjektive Beurteilungen der Innengeräuschanreicherung

Aufgrund diverser Randbedingungen liegt nur für den EBo1 eine ausreichende Anzahl von Fahrbeurteilungen zum ASD-System vor. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Gegensatz zu dem in einem Porsche Boxster bislang üblichen, eher emotionalen Innen- und Außensound ist der Boxster e sehr dezent bedatet, was dazu führt, dass die bislang gewohnte Emotionalität vermisst wird.
- Einige Nutzer erwarten von einem Porsche Boxster mit Elektroantrieb mangels einschlägiger Erfahrungen einen Sound, der den bekannten Klang des Boxermotors nachbildet; dies ist jedoch bei der Bedatung nicht die Absicht gewesen.

- Für die meisten Nutzer war das nahezu geräuschlose Fahren mit einem reinen Elektrofahrzeug eine neue, reizvolle Erfahrung; da es gelungen ist, störende Einzelgeräusche (z.B. Wasserpumpen zur Batteriekühlung; Klimakompressor) erfolgreich zu mindern, wurde der Maskierungseffekt durch ein ASD-System gar nicht vermisst, viele Probanden fuhren oft bewusst mit abgeschaltetem Sound und empfanden die künstliche Geräuschanreicherung als störend.
- Die akustische Signalisierung der Betriebsbereitschaft nach dem Drehen des Zündschlüssels wurde, sofern sie wahrgenommen wurde, positiv bewertet, ebenso die Warnfunktion gegenüber Fußgängern, z.B. beim Fahren in der Werkstatt, wo das Fahrzeug bei nicht aktiviertem ASD mehrfach nicht erkannt wurde.

Aus diesen Rückmeldungen lassen sich für das im EBo1 installierte System folgende Schlüsse ziehen:

- Der bisher in einem nach außen abgeschlossenen Raum unterhalb des hinteren Kofferbodens untergebrachte Außenlautsprecherbox muss an einen günstigeren Einbauort verlegt werden, zumindest muss eine akustische Öffnung nach außen geschaffen werden, um höhere Pegel abstrahlen zu können, ggfs. ist die Verstärkerleistung anzupassen. Der Einbauort für den Innenraumshaker ist zu optimieren, der aktuelle Anbringungsort ist zu steif und strahlt zu wenig Schall in den Innenraum ab.
- Die Bedatung ist stärker zu emotionalisieren.

### 2.3.2. Geräuschqualität

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden zwei Komponenten intensiver beleuchtet: die Anbindung des elektrisch angetriebenen Klimakompressors an die Karosserie sowie die für die Wasserkühlung der Traktionsbatterie installierten Wasserpumpen und -leitungen.

#### Anbindung des elektrischen Klimakompressors:

Bei den bislang gebräuchlichen Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge ist der für die Funktion der Klimaanlage erforderliche Kompressor am Motorblock befestigt und wird üblicherweise über einen Riementrieb von der Kurbelwelle angetrieben. Aufgrund der Kompaktheit des im Boxster e eingebauten Elektromotors kommt eine Befestigung des Klimakompressors am Antriebsmotor nicht in Betracht, ein Antrieb über einen Riementrieb ist ebenfalls nicht vorteilhaft. Der Klimakompressor wird stattdessen bedarfsgerecht über einen eigenen, geregelten Hochvolt-Elektromotor angetrieben, die gesamte Einheit ist an der Karosserie (zur Nutzung kurzer Leitungslängen zum Klimagerät im Vorderwagen) befestigt.

Zur Vermeidung einer erhöhten Körperschalleinleitung vom Klimakompressor in die Karosserie wurden folgende Maßnahmen ergriffen:

- Identifikation von wenig empfindlichen Montageorten mit Hilfe von Übertragungsweganalysen (diese wurden in dem sonst vom Kraftstofftank genutzten Bauraum gefunden)
- Entwicklung einer wirksam isolierenden Befestigungskonsole für die Kompressoreinheit (hierzu wurden Vorversuche an einem modifizierten Serien-Boxster durchgeführt).

Letztendlich konnten Optimierungspotentiale gegenüber der Erstauslegung von mehr als 10 dB im Innenraum-Schalldruckpegel erschlossen werden.

#### Wasserpumpen und -leitungen zur Batteriekühlung

Um einen zuverlässigen Batteriebetrieb gewährleisten zu können, wurde für die Traktionsbatterie ein Kühlsystem mit einem geschlossenen Kühlwasserkreislauf entwickelt. Zur Vermeidung lokaler Überhitzungen sind in diesem Kreislauf insgesamt drei elektrisch betriebene Zirkulationspumpen angeordnet, zwei innerhalb des Batteriepacks und eine weitere im Vorderwagen. Die aus Serienfahrzeugen übernommenen Zirkulationspumpen zeigen bei den ersten Erprobungen eine erhöhte Alterung, die darauf beruht, dass die Pumpen nicht in der vorgesehenen Montagelage eingebaut werden konnten; hier sind Nachbesserungen in Betracht zu ziehen. Erhöhter Körperschalleintrag über nicht ausreichend entkoppelte Kühlwasserleitungen konnte durch die Anbringung geeigneter Entkoppelelemente beseitigt werden.

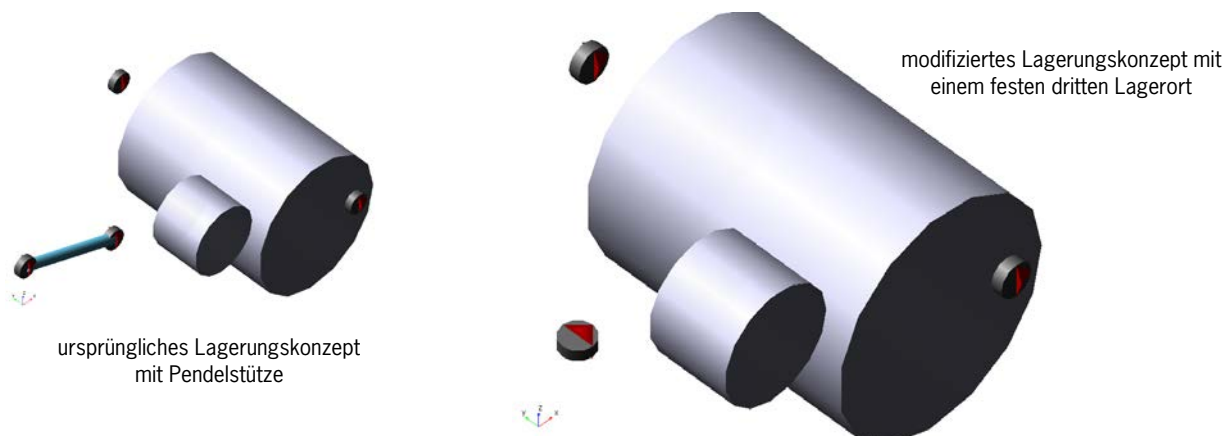
#### 2.3.3. Schwingungskomfort/Karosseriezittern

Mit Hilfe von Mehrkörper-Schwingungssimulationsrechnungen (MKS) wurden die Anbindung des Motor-Getriebeblocks an die Karosserie sowie die Aufhängung des wassergekühlten Batterieblocks im Fahrzeug überprüft.

#### Anbindung des Motor-Getriebeblocks an der Karosserie

Eine optimale Triebwerkslagerung ist dazu in der Lage, unerwünschte Körperschalleinleitung vom Triebwerk in die Karosserie maximal zu isolieren, ohne dass unerwünschte Nebenwirkungen wie Aggregatestuckern (Starrkörperschwingungen des Aggregats bei Fahrt auf unebener Fahrbahn) oder ausgeprägte Lastwechselreaktionen beim schlagartigen Betätigen oder Entlasten des Fahrpedals auftreten.

Mit Hilfe der durchgeführten MKS-Simulationen konnte aufgezeigt werden, dass durch die gewählte Pendellagerung bei guter Körperschallisolation nur ein geringes Stuckerrisiko hervorgerufen wird. Allerdings führten bei der ursprünglich gewählten konstruktiven Ausführung die im Rekuperationsbetrieb anliegenden hohen Schubmomente zu einem Überdrücken der vorgesehenen Pendelstütze und damit in diesem Fahrbetrieb zu einem erhöhten Körperschalleintrag. Aus diesem Grund wurde die Pendelstütze durch eine Abstützung mit einem aggregatefesten Tragarm substituiert.

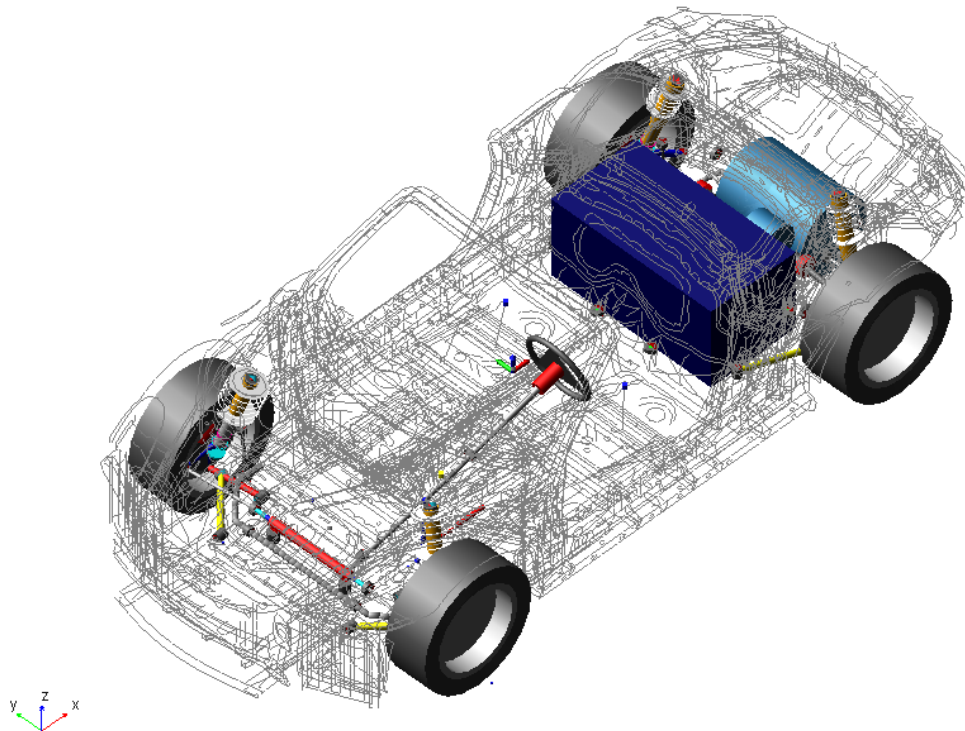


**Abbildung 39: Lagerungskonzepte**

### Anbindung des Batterieblocks an die Karosserie

Der wassergekühlte Batterieblock für die Traktionsbatterie ist in einem festen Rahmen integriert. Zum Ausgleich von Toleranzen sowie zur Vermeidung von Körperschalleinleitung in die Karosserie wurde der gesamte Batterieblock über elastische Lagerelemente mit der Karosserie verbunden.

Mit Hilfe einer weiteren MKS-Simulation wurde untersucht, ob die elastisch angebundene Batteriemasse unerwünschte Schwingungsüberhöhungen bei real vorkommenden Fahrmanövern (z.B. bei Fahrt auf unebener Landstraße) zeigt. Dabei wurden keinerlei Auffälligkeiten festgestellt, die konstruktive Änderungen erforderlich machen.



**Abbildung 40: MKS-Modell zur schwingungsdynamischen Untersuchung der Batterieblockanbindung**

## 2.4. HV-Batterie, HV-Laden

Die Hochvoltbatterie wurde durch Porsche Engineering entwickelt, aufgebaut und ins Fahrzeug integriert. Sie wurde insbesondere für den Einsatz in einem Sportwagen ausgelegt und liefert eine dafür typische Leistung, bei gleichzeitig leichter Bauweise und günstiger Position im Fahrzeug. Diese Traktionsbatterie sitzt an der Stelle des Verbrennungsmotors des herkömmlich mit Mittelmotor angetriebenen Serienfahrzeugs. Dies wirkt sich positiv auf den Schwerpunkt des Fahrzeugs und damit auch auf dessen Fahrdynamik aus.

Die verwendeten Zellen aus Lithium-Eisen-Phosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) bieten einen sehr guten Kompromiss zwischen Energie- und Leistungsdichte. Sie gelten als besonders robust und sicher beim Betrieb mit hoher Belastung. Lieferant ist die Firma A123. Die insgesamt 440 Zellen mit je 20Ah Kapazität sind in 110 Elementen in Serie mit je 4 parallel geschalteten Einzelzellen verschaltet.

Bei ca. 375V ist die Batterie voll aufgeladen und stellt dann effektiv nutzbare 26kWh Energie zur Verfügung. Bei normaler Fahrweise ist somit eine Reichweite von über 150km möglich.

### 2.4.1. Technische Daten

#### **Elektrisch:**

- Energie: 29kWh (ca. 26kWh nutzbar)
- Leistung: 240kW (peak)
- Strom: 600A (peak)
- Spannung: 396V maximal  
363V nominal  
320V minimal
- Konfiguration: 110s4p in 10 Modulen mit 11s4p

#### **Zellen:**

- Hersteller: A123
- Typ: PHEV Prismatic Gen. 1.5
- Chemie:  $\text{LiFePO}_4$
- Kapazität: 20Ah
- Spannung: 3,3V

#### **Thermisch:**

- Betriebstemperatur:  $-20^\circ\text{C}$  bis  $45^\circ\text{C}$
- Batteriekühlung: flüssig

#### **Sonstiges:**

- Abmessungen: 550mm x 925mm x 625mm
- Gewicht: 345kg

### 2.4.2. Aufbau und Test der Batterie

Die wesentliche Struktur der Batterie übernimmt ein zentraler Tragrahmen, der in Leichtbauweise aus hochfestem Aluminium hergestellt ist (siehe Abbildung 41).



**Abbildung 41: Der zentrale Tragrahmen aus Aluminium**

Dieser trägt das Gesamtgewicht der Batterie von 345kg. An diesem Tragrahmen sind alle Komponenten im Inneren der Batterie befestigt. Die beiden Deckel aus glasfaserverstärktem Kunststoff dienen dem Schutz vor Schmutz und Feuchtigkeit. Um die elektromagnetische Abschirmung zu gewährleisten, sind die Deckel mit einem leitfähigen Lack beschichtet (Abbildung 42).



**Abbildung 42: EMV Beschichtung aus leitfähigem Lack**

Die Zellen sind in insgesamt zehn quaderförmigen Modulen mit jeweils 44 Einzelzellen untergebracht. Fünf Module sind in der oberen Hälfte der Batterie und fünf weitere Module im unteren Teil hängend angebracht. Im oberen Bereich der Batterie befinden sich Sicherungen, Schütze und elektrische Verteiler.

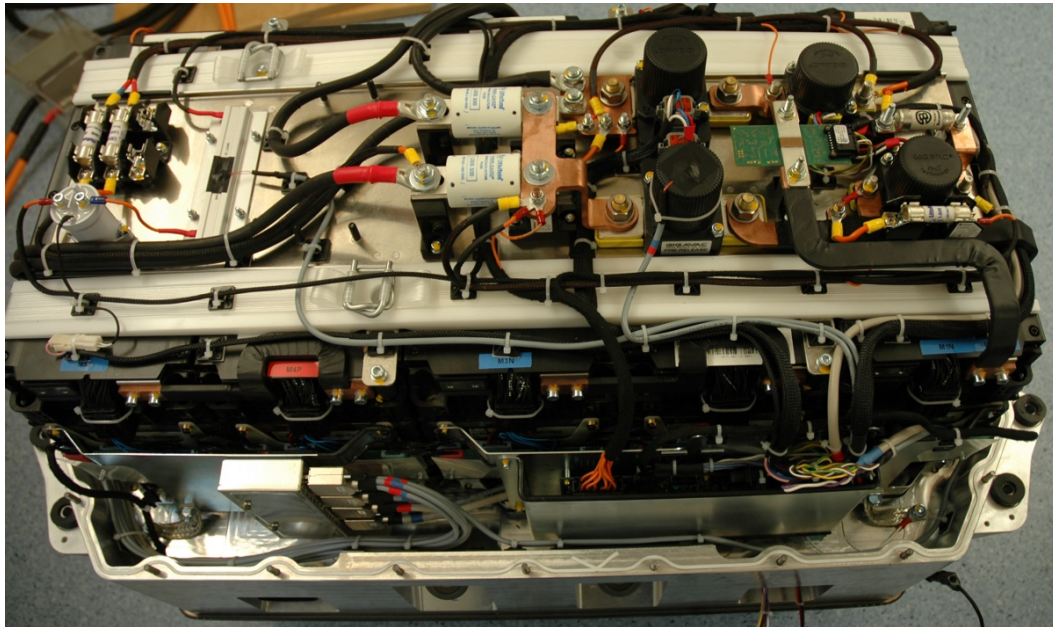
Alle elektrischen Anschlüsse sind durch schnell lösbare Stecker realisiert. Auch die Leitungen für die Wasserkühlung werden mit wasserdichten Schnellkupplungen aus dem Motorsport angeschlossen. Steht eine Hebebühne zur Verfügung, lässt sich die Batterie mit geeignetem Werkzeug in wenigen Minuten wechseln.

Die hohen Ströme zu transportieren, stellte eine besondere Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere für die Konstruktion und Auswahl der elektrischen Komponenten. Die elektrischen Leitungen wurden mit individuell gestalteten Stromschienen realisiert, die bis zu 80mm<sup>2</sup> Querschnitt aufweisen. Auch Sicherungen und Schütze sind für höhere Ströme als in Elektro-PKW üblich ausgelegt. Für die Schütze verwendeten wir erstmalig Exemplare der Firma Gigavac, die Ströme bis 1000A trennen können und in der Batterie problemlos ihren Dienst verrichteten.

Um die Menge des Kupfers und damit auch Gewicht und Kosten zu reduzieren, wurde bereits in der HV Batterie eine Verteilung der Leitungen realisiert (Abbildung 43).

Dies betrifft Pfade, die von außen über Stecker angebunden werden:

- 2 Traktionsleitungen (max. 300A) für vordere- und hintere EM
- 1 Leitung zum Klimakompressor (max. 30A)
- 1 Leitung zum PTC Heizer (max. 30A)
- 1 Eingang für das On-Board Ladegerät (max. 30A)



**Abbildung 43:** Im oberen Bereich sind Schütze, Sicherungen und die Hochvoltverteilung untergebracht.

Vor dem Einbau der Batterie ins Fahrzeug wurden auf einem eigens dazu aufgebauten Batterieprüfstand erste virtuelle Runden auf der Teststrecke simuliert und das Batterieverhalten getestet.

Eine weitere wichtige Funktion ist die korrekte Berechnung des Ladezustands (zwischen 0% und 100%). Dieser wird erst nach der Kalibrierung zahlreicher Parameter im System verlässlich ermittelt und dem Fahrer im Cockpit angezeigt.

### 2.4.3. Batteriemanagement

#### Überwachung der Batterie

Beim Betrieb von Lithiumzellen muss gewährleistet werden, dass sich deren Spannung ständig in einem vom Hersteller vorgegebenen Bereich befindet. Über- oder Unterspannung kann die Lebenserwartung der Zellen reduzieren oder diese im Extremfall zerstören. Ähnliches gilt für die Betriebstemperatur. Zu warme Zellen altern schneller, zu kalte Zellen liefern nur eingeschränkte Leistung.



An der Front der Module sind die Platinen der sogenannten Zellcontroller zu sehen. Diese überwachen permanent Spannung und Temperatur der Zellen, um möglichen Schäden durch Über- bzw. Unterspannung oder zu hohe Temperaturen vorzubeugen. Die gemessenen Daten werden im zentralen Batteriemanagementsystem (BMS) ausgewertet. Dieses System sendet die notwendigen Informationen über das Bordnetz an die Motorsteuerung und das eingebaute 220V Ladegerät. Somit wird im Lade- und Fahrbetrieb die Batterie kontrolliert geladen bzw. entladen.

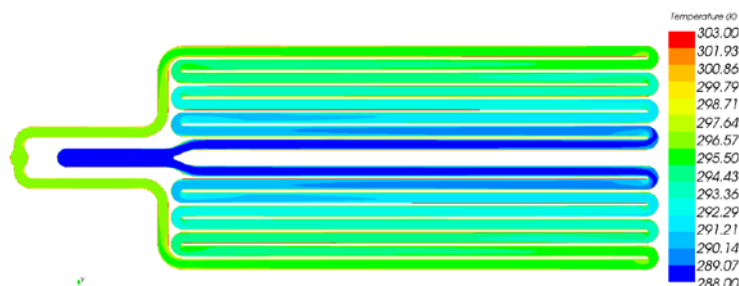
Zum Einsatz kam hier das BMS, welches von Volkswagen in Braunschweig auch für die e-Golf und e-Up Flotte entwickelt wurde.

Bevor das System im Boxster e eingesetzt werden konnte, musste es für den Leistungsbereich des Fahrzeugs und die verwendete Zellchemie parametrisiert werden.

### Thermomanagement

Damit die Zellen in ihrem Temperaturarbeitsbereich von ca.  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $45^{\circ}\text{C}$  bleiben, müssen sie bei Bedarf erwärmt oder gekühlt werden. So wird die Batterie z.B. im Ladebetrieb thermisch vorkonditioniert. Eine besondere Herausforderung stellt die Wärmeentwicklung bei sportlicher Fahrweise dar. Hier können in der Batterie über 5kW Wärmeverluste entstehen, die abgeführt werden müssen. Würde man eine Luftkühlung einsetzen, wäre pro Sekunde ein Luftvolumen von 500 Litern erforderlich, was sich bei dem zur Verfügung stehenden Bauraum nicht umsetzen ließe. In der Mitte des Tragrahmens befinden sich daher fünf Kühlplatten, welche die Zellen jeweils eines oberen und unteren Zellmoduls mit Flüssigkeit kühlen.

Diese Platten sind zum einen so optimiert, dass sie einen sehr guten Kontakt zu den Zellmodulen aufweisen. Dies bewirkt einen optimierten Wärmetransport in das Kühlmittel. Zum anderen sind die Kühlkanäle so gestaltet, dass die Druckverluste niedrig und die Verteilung der Temperatur in der Platte sehr homogen ist (Abbildung 44).



**Abbildung 44: Homogene Wärmeverteilung in der Kühlplatte**

Für die Batteriekühlung besteht ein eigener Niedertemperaturkreislauf. Bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen findet eine Erwärmung über einen Hochvoltheizer statt. Bei mittleren Temperaturen erfolgt der Wärmeaustausch über einen Luftwärmetauscher (Kühler). Bei hohem Kühlbedarf wird der Klimakompressor hinzugeschaltet.

Detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.7.3.

#### 2.4.4. HV - Laden

Zum Laden der HV-Batterie wurde aus Gründen der Fahrzeugverfügbarkeit ein am Markt verfügbares Ladegerät eingesetzt, welches weltweit in vielen Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommt.

Die drei Ladegeräte mit einer max. Ladeleistung von 3,3 kW wurden in die Kommunikationsstruktur des Basisfahrzeugs integriert.



**Abbildung 45: 3,3 kW Ladegerät**

Die Schnittstelle zwischen Stromnetz und Fahrzeug ist kompatibel mit der internationalen IEC Norm 61851-1 und der US-amerikanischen Norm SAE J1772. Dadurch sind die Fahrzeuge mit allen Ladesäulen kompatibel, die entsprechend dieser Normen aufgebaut wurden. Dies trifft auf nahezu alle Ladesäulen zu, die in Deutschland aufgestellt werden/wurden. Weiterhin ist die klassische Ladung an jeder Haushaltssteckdose möglich.

Für die Ansteuerung und Bedienung der Ladeschnittstelle am Fahrzeug wurde eigens ein Steuergerät prototypisch entwickelt. Für die Steuerung und das Management des Ladevorgangs wurde eine Software entwickelt, die auf einem zweiten Prototyp-Steuergerät im Fahrzeug implementiert ist. Beide Steuergeräte sind in die Kommunikationsstruktur des Basisfahrzeugs neu eingebunden.

Zusätzlich wird auf die Komponente der Leistungselektronik zurückgegriffen, um während des Ladevorgangs der HV-Batterie eine Nachladung des 12V Bordnetzes zu gewährleisten. Somit wird das Fahrzeug während des Ladevorgangs ganzheitlich elektrisch geladen.

## Ladedose

Um dem Fahrzeugnutzer eine möglichst direkte Information über den Ladestatus des Fahrzeugs zu geben, wurde direkt an der Ladedose eine LED-basierte Rückmeldung implementiert.

Im Betrieb hat sich gezeigt, dass sich Position und Art der Rückmeldung für den Fahrzeugnutzer positiv auswirken. Durch die Ausgabe der wesentlichen Informationen während des Ladebetriebs über eine Farbkodierung konnten die Fahrzeugnutzer ohne große Adaptionzeit das Fahrzeug selbständig und sicher Laden.



**Abbildung 46: Ladedose**

Die Leuchtfarben haben folgende Bedeutung:

- Unbeleuchtet: Fahrzeug kann durch Stecken des Ladesteckers aktiviert werden
- Grün / Orange pulsierend: Bereit für Anschluss des Ladekabels
- Blau: Ladevorgang aktiv, Stecker ist verriegelt, kann nicht abgezogen werden.
- Gelb: Fahrbetrieb (Ladestecker nicht einstecken)
- Orange: Versuch zum Übergang in den Ladebetrieb
- Rot: Störung

## 2.5. Fahrwerk, elektrische Lenkung und Bremssystem

### 2.5.1. Lagerung der E-Maschinen

Die Lagerung der E-Antriebseinheiten im Fahrzeug ist mit modernsten Berechnungsmethoden ausgelegt worden. Da diese Bauteile an Vorder- und Hinterachse neu konstruiert und gefertigt worden sind, ist eine Absicherung nach den geltenden Porsche Freigaberichtlinien notwendig geworden, d.h. u. a. ein Fahrzeug-Dauerlauf über mindestens 2000 km mit regelmäßigen Inspektionsintervallen der Bauteile.

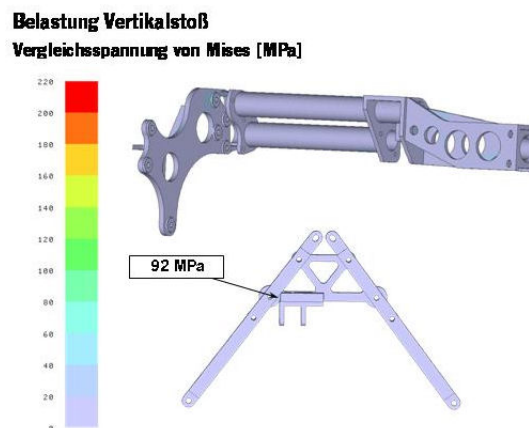


Abbildung 47: Festigkeitsberechnung der EM-Lagerung an der Vorderachse

Gegenüber Verbrennungsmotoren erfordert die Krafteinleitung der Reaktionsmomente von EM eine veränderte Dimensionierung der Querträger der Vorder- und Hinterachse. Aufgrund der im Fahrbetrieb auftretenden Lastkollektive in einem performanten E-Fahrzeug ist beispielsweise der Blechquerschnitt des Hinterachsquerträgers an der zentralen Krafteinleitungsstelle um 400% erhöht worden, um der angreifenden Längskraft aus dem EM-Drehmoment standzuhalten.

### 2.5.2. Rekuperationsbremssystem

Bei herkömmlichen Bremssystemen wird im Verzögerungsfall die kinetische Energie durch Reibung in Wärme umgesetzt und geht damit verloren. Bei E-Fahrzeugen, wie dem Porsche Boxster e, kann der Antriebsstrang auch als Generator verwendet werden und ein Teil der kinetischen Energie in die Batterie zurück gespeichert werden. Ein so genanntes „**Cooperative Regenerative Brake System**“ (CRBS) stellt sicher, dass die Verzögerungsanforderung durch den Fahrer zunächst durch die Rückgewinnung von elektrischer Energie realisiert wird. Sobald dieser Fahrerbremswunsch das Rekuperationspotential des Generators überschreitet kommt die konventionelle Reibbremse zum Einsatz.

In den folgenden Abschnitten werden die CRBS Hardwarekomponenten, die Funktionsweise und die gewonnenen Ergebnisse erläutert.

### Systemkonzept

Das folgende Schaubild zeigt den Hydraulikschaltplan des ESP 9 hev der Firma Bosch. Die gelb markierten Komponenten sind jene, welche sich von einem Standard Bremsystem der Firma Bosch unterscheiden. Wie aus der Abbildung 48 hervorgeht gibt es keine Änderung an der Vorderachshydraulik. Durch diesen hydraulischen Durchgriff bleibt die Rückmeldung am Bremspedal sowie die typischen Pedalvibrationen im ABS gebremsten Fall erhalten.

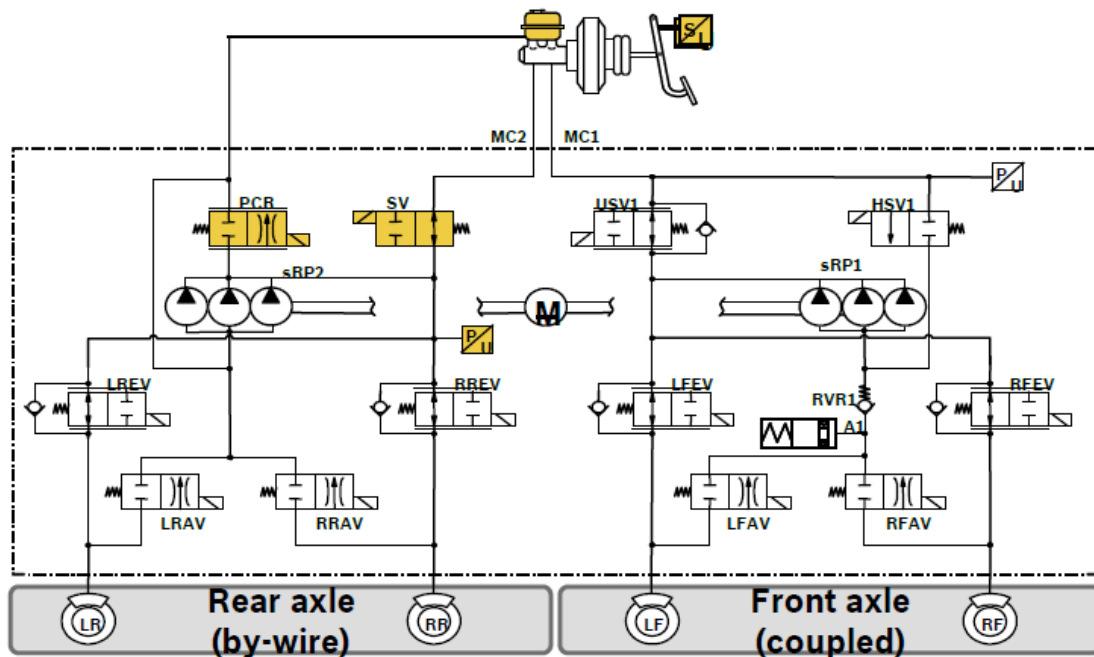


Abbildung 48: Hydraulikschaltplan des ESP 9 hev der Firma Bosch

### Fail-Safe Konzept

Das ESP 9 hev bietet durch das in Grundstellung offene SV-Ventil eine sichere Rückfallebene. Im stromlosen Fall wird das SV-Ventil nicht geschlossen und es ist ein direkter hydraulischer Durchgriff aus dem Hauptbremszylinder auf die Hinterachse möglich.

Die Hydraulik an der Vorderachse ist konventionell konzipiert und bietet sowohl im Vollsystem als auch in der Rückfallebene einen direkten Durchgriff.

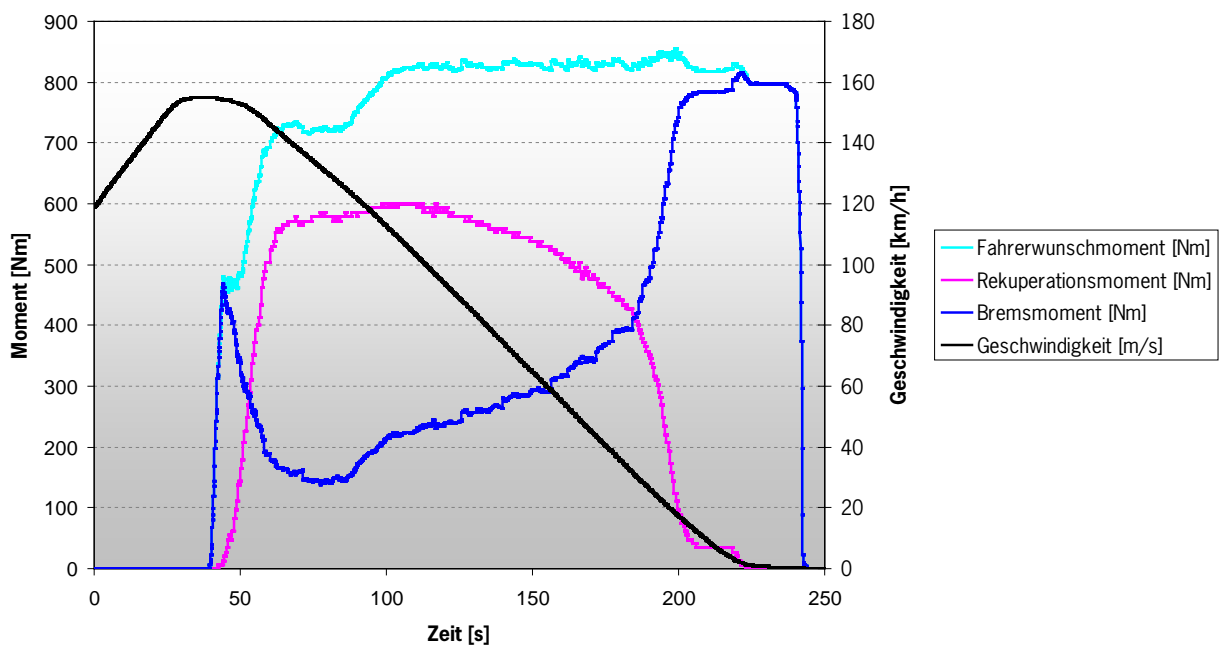
## Blendingfunktion

Folgende Abbildung 49 zeigt eine Teilbremsung auf trockenem und ebenem Asphalt aus ca. 150 km/h mit konstanter Verzögerung. Dabei wurde ein Fahrzeug mit Hinterachsrekuperation vermessen. Der Fahrerbremswunsch, hellblau dargestellt, berechnet sich aus dem Bremspedalweg und dem Bremsdruck im Hauptbremszylinder. Zur Realisierung der Blendingfunktion an der Hinterachse gilt die folgende Gleichung:

$$\text{HA\_Fahrerbremswunsch} = \text{HA\_Rekuperationsmoment} + \text{HA\_Bremsmoment}$$

Im Boxster e Projekt stellt die Motorsteuerung in Abhängigkeit des Bremspedalweggebers ein Rekuperationsmoment. Die Aufgabe des ESP besteht darin, auf das anliegende Rekuperationsmoment zu reagieren und den Bremsdruck der Hinterachse so zu modulieren, dass der Fahrerbremswunsch nach obiger Gleichung erfüllt wird. Damit soll ein gewohnt Sportwagen typisches Pedalgefühl sowie eine konstante Fahrzeugverzögerung, unabhängig von der Verteilung zwischen Rekuperations- und hydraulischem Bremsmoment, realisiert werden.

Fahrsituationsbedingt nimmt das Rekuperationsmoment mit geringer werdender Geschwindigkeit ab, bis es kurz vor Fahrzeugstillstand komplett auf Null reduziert wird. Zur Erhaltung der Momentenbilanz des Gesamtfahrzeugs wird analog zur Reduktion des Rekuperationsmoments das mechanische Bremsmoment erhöht.



**Abbildung 49: Überblendung der Bremsmomente im ESP9hev Rekuperationsbremssystem**

### Empfehlung zur Realisierung des Leerwegs im Bremssystem

Beim ESP 9 hev wird nur die Hinterachse geregelt, wodurch ausschließlich das Moment rekuperiert werden kann, welches an der Hinterachse abgesetzt wird. Diesbezüglich ist das ESP 9 hev für die heckgetriebenen Boxster e gut geeignet. Die erhofften funktionalen Vorteile haben sich voll umfänglich darstellen lassen, so dass diese Technologie in den Auswahlprozess für zukünftige Anwendungen in E-Fahrzeugen einfließen kann.

Für Allrad getriebene Fahrzeuge, bei welchen an beiden Achsen sowohl Antriebs- als auch Rekuperationsmomente abgesetzt werden, gestaltet sich das Blending aufwendiger. Analog zu obiger Gleichung gilt auch hier: Die Summe der Bremsmomente entspricht dem Fahrerbremswunsch.

$$\begin{aligned} \text{HA\_Fahrerbremswunsch} &= \text{VA\_Rekuperationsmoment}^*) \\ &+ \text{HA\_Rekuperationsmoment} \\ &+ \text{HA\_Bremsmoment} \end{aligned}$$

\*) VA\_Rekuperationsmoment wird über die HA verblendet

Da die Vorderachse nicht blendfähig ist muss das Rekuperationsmoment der Vorderachse ebenfalls über die Hinterachse verblendet werden, wodurch es zu Momentenverschiebungen zwischen Vorder- und Hintersachse kommt. Dies kann verstärkt bei weichen Fahrwerken zu Nickbewegungen im Fahrzeugaufbau führen.

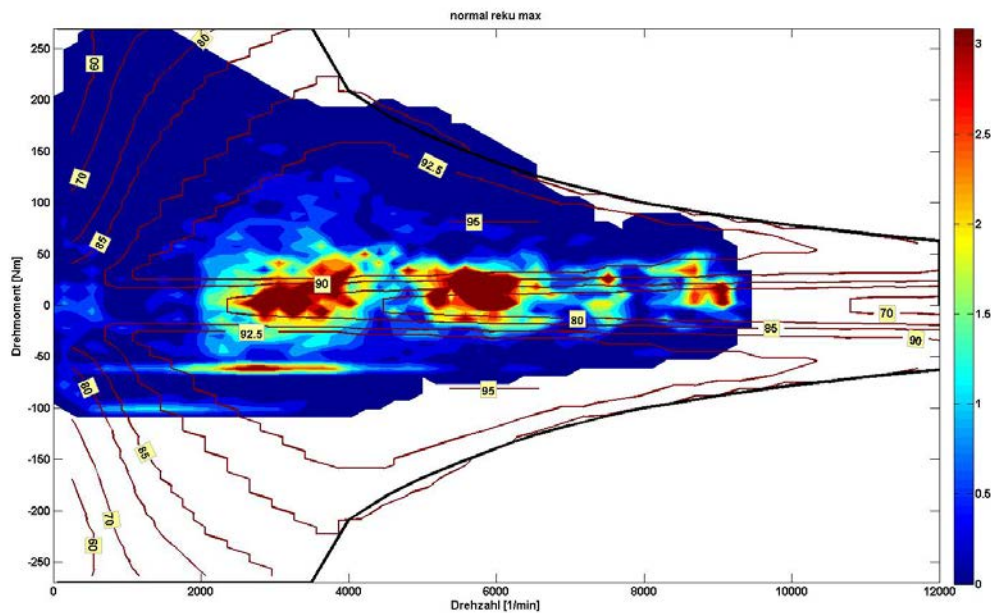
Angenommen das Rekuperationsmoment der Vorderachse ist identisch dem der Hinterachse. Anhand obiger Abbildung 49 ist dann ersichtlich, dass der Fahrerbremswunsch allein durch die Summe der Rekuperationsmomente bereits deutlich überschritten ist.

In einem Fahrzeug welches über beide Achsen rekuperiert ist ein Bremssystem wie der iBooster hev besser geeignet, da dieses System über das Gesamtfahrzeug verblenden kann und die Potentiale der Generatoren voll ausgenutzt werden.

#### 2.5.3. Häufigkeitsverteilung der Rekuperationsmomente in der Stuttgart-Runde

In Abbildung 50 ist beispielhaft die Häufigkeitsverteilung der Antriebs- und Rekuperationsmomente über der EM-Drehzahl bei einer Fahrt in der höchsten Rekuperationsstufe dargestellt.

Im Schub, ohne Betätigung der Bremse, stellt sich in dieser Rekuperationsstufe ein elektrisches Bremsmoment von 65 Nm ein. Im gebremsten Fall steigt das Rekuperationsmoment auf etwa 110 Nm an. Die weiteren roten Bereiche bei etwa 3500 und 5000 1/min sind Teillastbereiche in denen die Geschwindigkeit gehalten wird wie z.B. Innerorts oder auf Landstraßen.



**Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der Antriebs- und Rekuperationsmomente**

#### 2.5.4. Subjektive Beurteilung des Rekuperationsbremssystems

Die im Folgenden dargestellten subjektiven Ergebnisse zum Verzögerungs- und zum NVH-Verhalten basieren auf Testfahrten von Porsche internen Fahrwerks- und Bremsenexperten.

##### Beurteilung Bremspedalgefühl und Verzögerungsverhalten

- Systemdynamik an HA: HA-Bremskraft baut sich zu langsam und zu spät auf: Applikation oder Grenze der Systemdynamik erreicht?
- Überblendung besonders beim Herausrampen de EM vor Stillstand gut
- Etwas langer Bremspedalweg für PCCB (Grund: Lüftspielsättel)
- Hysterese im Bremspedal an oberer Toleranzgrenze

##### Beurteilung NVH-Verhalten

- ESP Pumpenanlauf und damit verbundenes Geräusch bei jeder Bremsbetätigung noch nicht kundenfähig.
- Teilweise kann der Schallübertrag in den Innenraum durch verbesserte ESP-Aggregatlagerungen reduziert werden, jedoch bleiben die Pumpenanläufe auf Grund der fehlenden Umgebungsgeräusche in einem E-Fahrzeug auffälliger als in einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.



### 2.5.5. Systemabsicherung und Straßenfreigabe

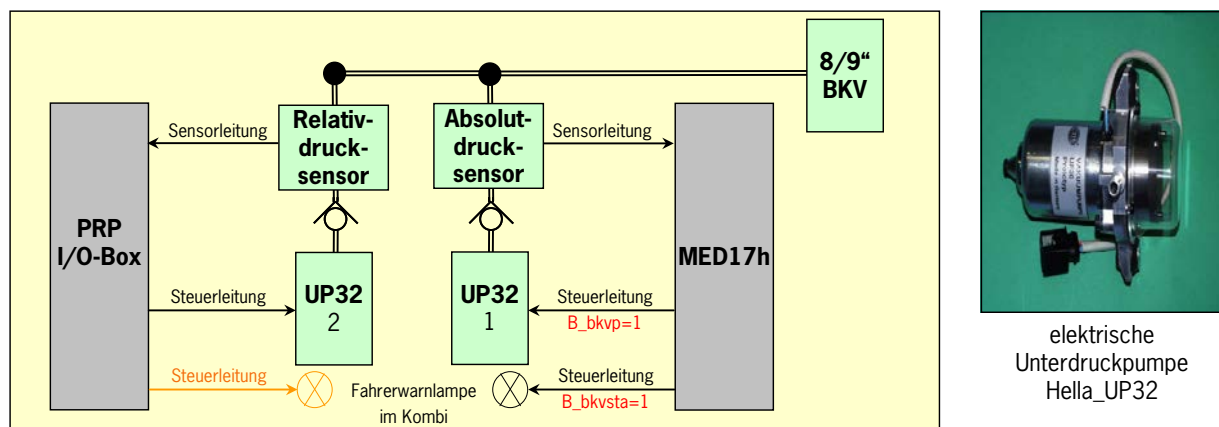
Das ESP mit seinen verblindungs- und fahrstabilisierenden Funktionen ist für eingewiesene Porschemitarbeiter auf der öffentlichen Straße freigegeben.

#### Unterdruckmanagement

Bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen wird der zur Bremskraftunterstützung benötigte Unterdruck üblicherweise von mechanisch angetriebenen Unterdruckpumpen bereitgestellt.

Bei Hybrid-, bzw. PHEV-Fahrzeugen mit hydraulischen Bremssystemen kommt zusätzlich zur mechanischen eine elektrische Unterdruckpumpe [ELUP] zum Einsatz, die den Unterdruckbedarf im rein elektromotorischen Fahrbetrieb sicherstellt. Kann die bezüglich der Evakuier Performance trägere ELUP den Unterdruckbedarf nicht hinreichend decken, wird die Verbrennungskraftmaschine [VKM] über ein intelligentes Unterdruckmanagement, welches im Motorsteuergerät integriert ist, gestartet. Die mechanische Unterdruckpumpe liefert in diesem Fall gemeinsam mit der ELUP den zur Bremskraftunterstützung benötigten Unterdruck.

Bei reinen Elektrofahrzeugen, wie den Boxster e Konzeptfahrzeugen, steht diese Hilfs-[Failsafe-] Maßnahme nicht zur Verfügung. Deshalb kommen zwei ELUP zum Einsatz.

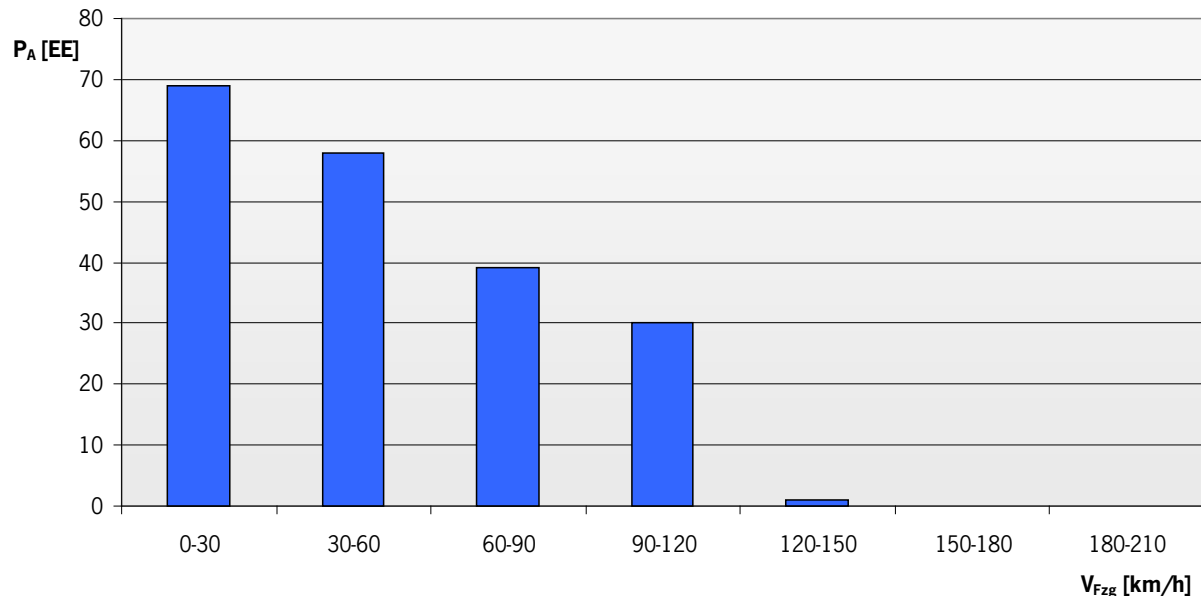


**Abbildung 51: Unterdruckversorgung im 987\_Boxster e**

Die Pumpe UP32\_1 liefert den Hauptanteil des Unterdruckbedarfes. In Abhängigkeit des Absolutdruck Sensorwertes wird die UP32\_1 zwischen definierten Ein- und Ausschaltsschwellen über das Motorsteuergerät angesteuert. Die Schaltschwellenwerte variieren über der Fahrzeuggeschwindigkeit und der geographischen Höhe. Beim Unterschreiten einer zusätzlichen, niedriger bedateten Einschalt-Druckschwelle, der Failsafe-Schaltsschwelle, wird die UP32\_2 angesteuert und liefert zusammen mit der UP32\_1 den benötigten Unterdruck.

## Messungen

Die auf dem Markt befindlichen ELUP weisen mit ihren Kohlebürsten eine begrenzte Lebensdauer auf. Um eine Abschätzung über die zu erwartende Lebensdauer vornehmen zu können wurden spezielle Messungen in einem für die ELUP extrem belastenden Fahrkollektiv in höheren Lagen im Schwarzwald durchgeführt.



**Abbildung 52: Zusammenhang zwischen Pumpenanläufen und Fahrzeuggeschwindigkeit**

Das Schaubild zeigt auf der Abszisse die Anzahl der Pumpenanläufe UP32\_1 über einer Strecke von 108 km, auf der Ordinate die klassifizierte Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]. Erwartungsgemäß liegt die Hauptbelastung der ELUP\_UP32\_1 im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, im innerstädtischen Fahrbetrieb.

Eine Hochrechnung der Pumpenanläufe auf 200.000 km aus diesem Höhen-Test ergibt 361.958 Pumpenanläufe. Hella bestätigt als Lieferant eine Lebensdauer von 900.000 Pumpenanläufen. Unter der Annahme einer überwiegend innerstädtischen Nutzung der Boxster e Konzeptfahrzeuge, ist bei einer Laufleistung von 200.000 km mit ca. 850.000 - 875.000 Pumpenanläufen eine ausreichende Lebensdauer der UP32 1 gewährleistet.

Die Messungen haben außerdem ergeben, dass auf den Einsatz einer Failsafe-Pumpe [UP32\_2] verzichtet werden könnte. Während der gesamten Messungen kam es nur ein einziges Mal zum Einschalten der UP32 2.

Bei Ausfall der elektrischen Unterdruckpumpen ist außerdem über die mechanische Übersetzung der Bremspedalkinematik die gesetzeskonforme Bremsverzögerung sichergestellt.

## Elektromechanisches Lenksystem

Die bedarfsgerechte Regelung der elektromechanischen Servolenkung trägt zur Energieeinsparung des E-Fahrzeugs gegenüber einer hydraulischen Lenkung bei, indem das elektrische 12V-Bordnetz nur dann beansprucht wird, wenn eine Servounterstützung der Lenkung erforderlich ist. Diese Technologie gehört aus Sicht von Porsche zum Standardumfang eines energetisch optimierten Fahrzeuges.

Im Vergleich zu der hydraulischen Servolenkung im gleichen Fahrzeugmodell (Boxster) beträgt die mittlere Aufnahmeleistung der elektromechanischen Lenkung bei einer durchschnittlichen Stadt-/ Landstraßen-/ Autobahnfahrt in der Region Stuttgart nur 1,4% der aufgenommenen Leistung der hydraulischen Servolenkung. Im Falle des Parkierens 7,8% der Leistungsaufnahme des hydraulischen Lenksystems.

Die eingesparte Antriebsleistung des Lenksystems kann direkt in eine gesteigerte Reichweite ohne Einbußen in den kundenrelevanten Lenkeigenschaften umgesetzt werden.

Durch definierte Fahrversuche, auch im fahrdynamischen Grenzbereich, ist die Funktion des Systems und die funktionale Sicherheit nachgewiesen worden. Die Freigabe baut ebenfalls auf den Erfahrungen der parallel verlaufenden Serienentwicklung eines elektrohydraulischen Lenksystems für die Modelle 911 Carrera und Boxster auf.

### 2.5.6. Reduzierung der Fahrwiderstände

Bei E-Fahrzeugen hat die Reduzierung von Fahrwiderständen einen ganz besonderen Einfluss auf die Reichweite des Fahrzeuges. Im Fahrwerksbereich wurden folgende Maßnahmen getroffen um die Fahrwiderstände möglichst gering zu halten:

- Bremssättel mit speziellen Maßnahmen zur Minimierung der Restbremsmomente zwischen Bremsbelägen und Bremsscheiben.
- Erhöhung des Reifenluftdruckes um 0,2 bar gegenüber dem Serienluftdruck für das beladene Fahrzeug.
- Reduzierung der rotatorischen Trägheiten durch Leichtbau-Räder und Bremsscheiben.

## 2.6. Elektroantrieb, Antriebsmanagement

Zur Erfüllung der wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens wie z.B.:

- Elektrofahrzeugkonzept im Premiumsegment
- Auslegung eines geeigneten Antriebssystems und seiner Einzelkomponenten
- Betriebsstrategien für optimalen Verbrauch und Performance
- Anpassung der Fahrzeugeigenschaften an veränderte Kundennutzung
- Optimierung Kundenakzeptanz
- Ermittlung der Strombedarfe, Wirtschaftlichkeit eines Elektrofahrzeugs

wird eine leistungsfähige Antriebsstrangsimulation benötigt. Diese dient über die gesamte Projektlaufzeit zur Auslegung, Untersuchung und Optimierung des Antriebsstranges.

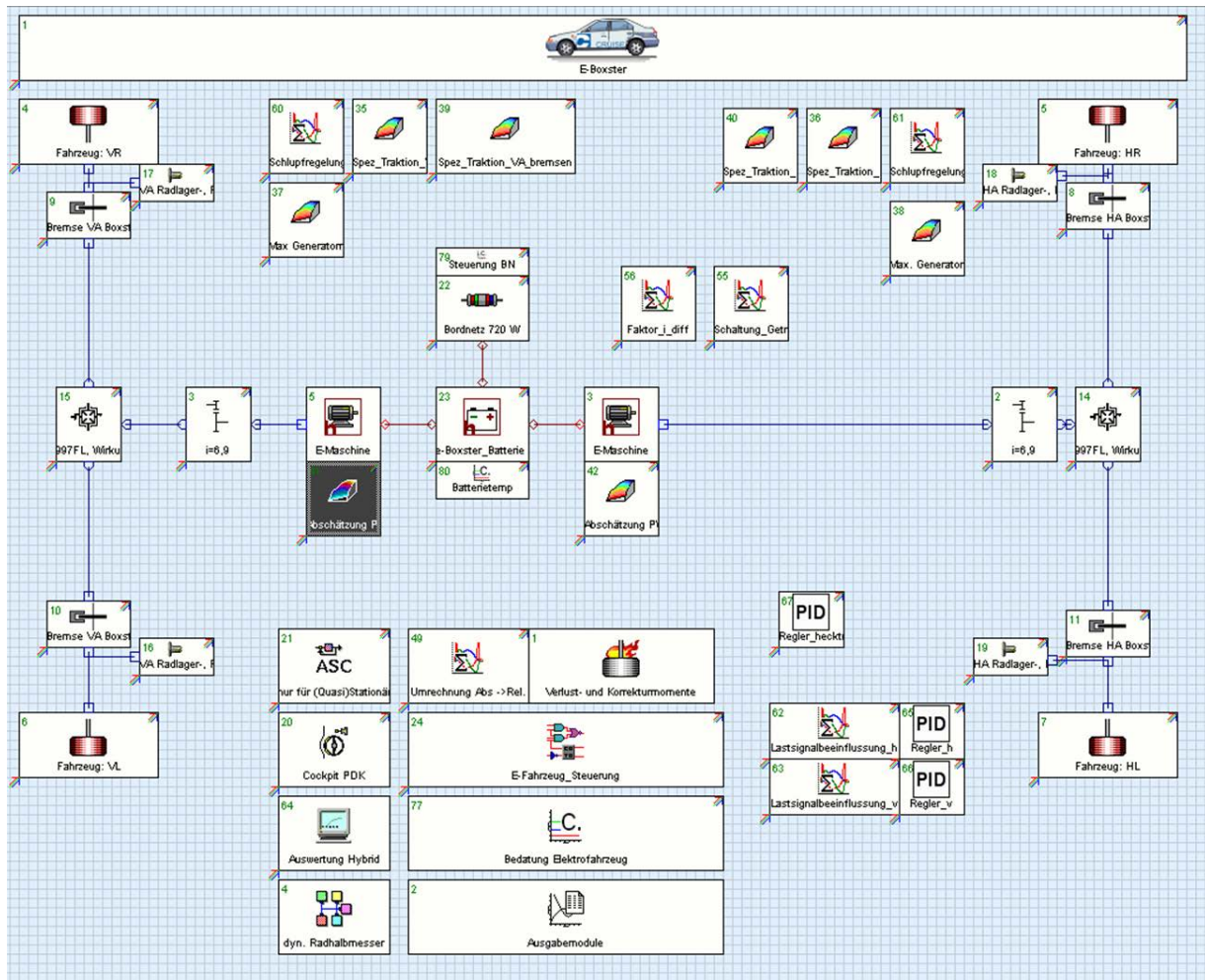
Mit dem Antriebsstrangsimulationsprogramm AVL Cruise wurde hierzu ein modulares Simulationsmodell von einem vollelektrischen Antriebsstrang aufgebaut. Mit diesem Simulationsmodell wurden über die Projektlaufzeit im Wesentlichen folgende Inhalte untersucht:

- Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkombinationen ob sie die generellen Ziele einer NEFZ-Reichweite von 150 km und einer Beschleunigung von unter 6 Sekunden von 0 auf 100 km/h erfüllen können
- Untersuchung der Energieeffizienz verschiedener Antriebsstrangvarianten und Antriebsstrangkomponenten
- Dimensionierung und Auslegung der zentralen Antriebsstrangkomponenten
- Definition von Anforderungen des Antriebs an andere Fahrzeugkomponenten
- Abgleich der Simulation mit Messungen und Parametervariation
- Optimierung von elektrofahrzeugspezifischen Betriebsstrategien
- Ableitung von Optimierungspotenzialen

Auf diese Unterpunkte wird im Folgenden detailliert eingegangen.

Die Abbildung 53 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells in AVL Cruise. Das Modell beinhaltet u.a. eine Hochvoltbatterie, zwei EM und das restliche Fahrzeugmodell. Der Steuerungs- und Funktionsblock im unteren Bereich der Abbildung 53 beinhaltet die spezifische Betriebsstrategie für ein vollelektrisches Fahrzeug.

Nicht abgebildet sind der Fahrregler und die Fahrprofile. Diese ermöglichen es frei definierbare Fahrkurven wie z.B. gesetzliche Zyklen (FTP-75, NEFZ), Realverbrauchszyklen wie z.B. die Stuttgart-Runde und sportliche Fahraufgaben (Nürburgring, Teststrecke) zu untersuchen.



**Abbildung 53: Aufbau des Simulationsmodells**

### 2.6.1. Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkombinationen

Bei der Untersuchung wurde zunächst von einem Konzept mit vier EM, wie im Antrag definiert, ausgegangen. Bei der Untersuchung der Antriebsstrangeffizienz zeigte sich jedoch, dass bei der Verwendung von vier Antriebseinheiten auch ein höherer Energiebedarf im Vergleich zu einer oder zwei Antriebseinheiten entsteht. Dieser erhöhte Energiebedarf hat u.a. folgende Ursachen:

- höheres Gewicht da mehr Komponenten, Kabel und Bauteile (Halter, etc) verwendet werden.
- Betrieb von vier Leistungselektroniken da jede EM eine Leistungselektronik benötigt. Diese Leistungselektroniken haben schon im Stillstand einen Grundbedarf an Energie.
- Betriebspunkte der Maschinen. Durch die Antriebsverteilung auf vier EM erfolgt eine Lastpunktverschiebung in ungünstigere Betriebspunkte. Dieser Effekt kann durch eine geänderte EM-Auslegung zum Teil kompensiert werden wodurch sich dann aber die Charakteristik der EM verändert. Dies kann sich dann wiederum auf andere Eigenschaften (z.B. Anfahrverhalten) des Fahrzeugs auswirken.

Des Weiteren wird durch eine schlechtere Energieeffizienz auch eine Batterie mit einem höheren Energiegehalt benötigt, um die geforderte Reichweite zu erzielen. Dies erhöht das Fahrzeuggewicht und die Kosten. Dadurch verringert sich dann auch ein späterer Kundennutzen da entweder eine geringere Reichweite oder höhere Kosten akzeptiert werden müssen.

Auf Basis dieser Simulations-Erkenntnisse wurden zwei Antriebsstrangkonzeppte mit einer oder zwei elektrischen Maschinen weiter verfolgt.

### 2.6.2. Auslegung der Antriebsstrangkomponenten

Bei der Auswahl der Antriebsstrangkomponenten spielt der Wirkungsgrad eine wesentliche Rolle. Entsprechend liegt der Fokus auf der optimalen Kombination von EM und Übersetzung. Ziel dabei ist es die EM möglichst häufig in Bereichen mit optimalem Wirkungsgrad zu betreiben. Zusätzlich soll durch die Wahl der Übersetzung ein porschetypisches, dynamisches Anfahrverhalten und eine kundentaugliche Höchstgeschwindigkeit erreicht werden.

Bei der Auslegung der EM können im Prinzip zwei grundlegende Varianten unterschieden werden:

- EM mit kleinem Rotordurchmesser besitzen eine hohe Maximaldrehzahl aber tendenziell weniger Drehmoment als elektrische Maschinen mit größerem Rotordurchmesser.
- EM mit größerem Rotordurchmesser haben hier im tiefen Drehzahlbereich Vorteile durch ein hohes Drehmoment besitzen jedoch eine tendenziell geringere Maximaldrehzahl da hier bei Rotation die Zentrifugalkräfte steigen.

Die Herausforderung bestand darin, die optimale Kombination von EM und Getriebe-Übersetzung zu finden, welche den Anforderungen bezüglich Beschleunigungsvermögen, Höchstgeschwindigkeit und Anfahrverhalten am besten erfüllt, wobei die Anforderungen im Zielkonflikt zueinander stehen.

Unter Betrachtung der ausgewählten EM ergaben sich anhand der Simulation die für die beiden Varianten 2WD und 4WD die folgenden Übersetzungsverhältnisse:

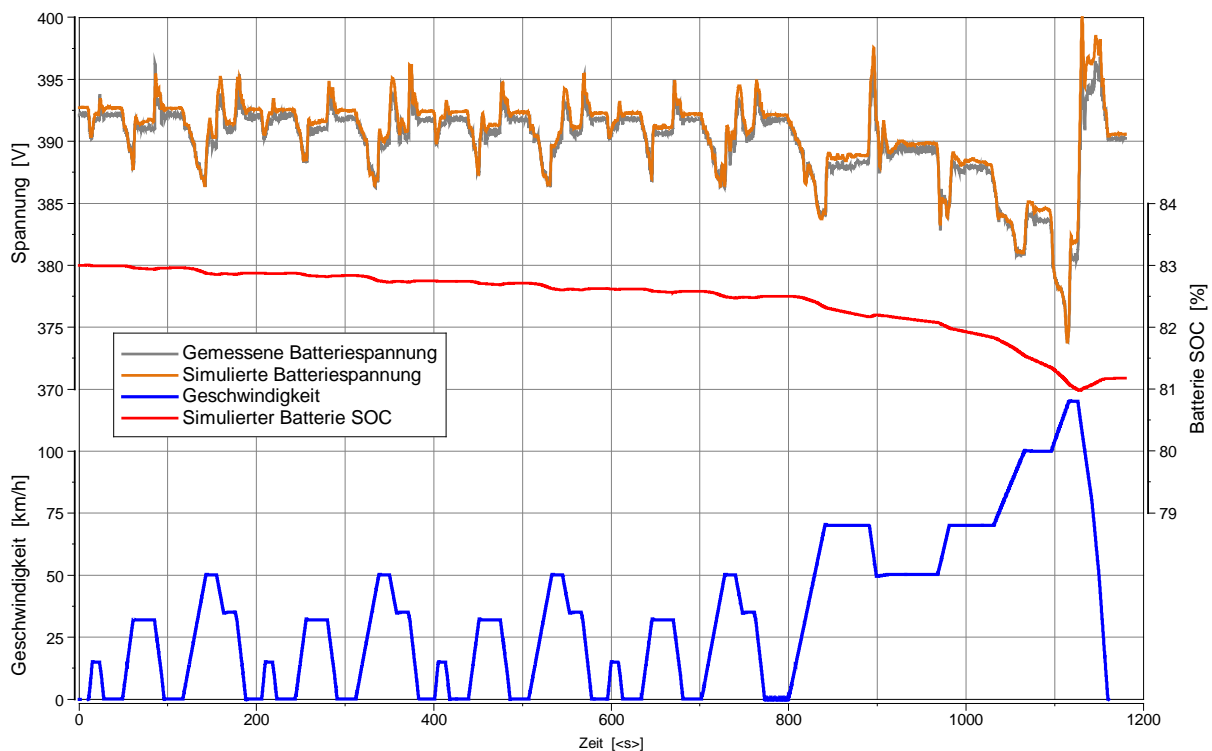
- Die **2WD Fahrzeuge** mit einer EM erhalten eine kurze Übersetzung mit  $i=9,81$ . Durch diese kurze Übersetzung wird eine Maximalgeschwindigkeit von 150 km/h ermöglicht und entspricht somit den Anforderungen für die urbane Mobilität. Gesetzliche Zyklen können mit dieser Übersetzung problemlos durchfahren werden. Durch die kurze Übersetzung ergibt sich mit dem maximalen Motormoment von 270 Nm ein Radmoment von 2650 Nm an der angetriebenen Achse. Dadurch wird ein gutes, für den urbanen Betrieb angepasstes Anfahrverhalten erreicht.

- Durch die zwei angetriebenen Achsen beim **Allradfahrzeug** kann das Radmoment zugunsten der Höchstgeschwindigkeit reduziert und gleichzeitig noch das Beschleunigungsvermögen verbessert werden. Durch eine Übersetzung von  $i=6,9$  ergibt sich somit eine Höchstgeschwindigkeit von ca. 200km/h. Das maximale Radmoment beträgt somit pro Achse etwa 1860 Nm, gesamt also ca. 3720 Nm. Damit besitzt das Fahrzeug ein höheres Zugkraftangebot und eine größere Maximalgeschwindigkeit. Ergänzt durch das neuartige Allradkonzept ergibt sich hier ein Fahrzeug mit einem sportlichen Charakter.

Mit Hilfe der Simulation wurden mit den festgelegten Auslegungsparametern zu erwartende Belastungen der restlichen Komponenten im Fahrzeug analysiert, wie Stromstärken in der Batterie und im Motor, sowie Beanspruchungen der Fahrwerkkomponenten berechnet und die Auslegung der Kühlsysteme vorgenommen.

### 2.6.3. Abgleich der Simulation mit Messungen und Parametervariation

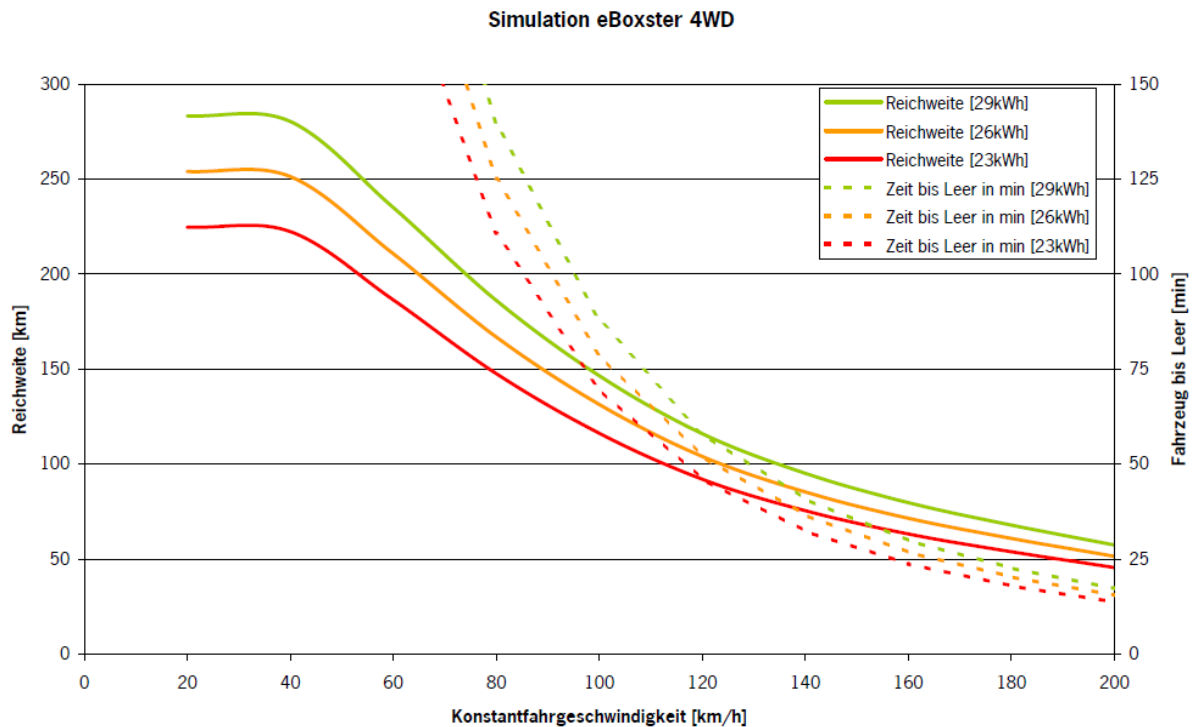
Anhand von Messungen mit den Fahrzeugen wurden Teile des Antriebsstrangmodells mit der Simulation abgeglichen.



**Abbildung 54: Beispiel für den Abgleich mit Messungen**

Die Abbildung 54 zeigt den Abgleich des Batteriemodells mit Messungen. Der simulierte Spannungsverlauf stimmt gut mit der Messung überein. Mit Hilfe des abgeglichenen Modells ist es möglich weitere Potenzialabschätzungen für die Optimierung von Elektrofahrzeugkonzepten oder Parametervariationen durchzuführen.

Ein Beispiel für eine Parametervariation ist in Abbildung 55 dargestellt. Hier wurde die Reichweite des Boxster 4WD bei konstanten Fahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten simuliert. Mit dem Modell lässt sich auch der Einfluss einer veränderten Batteriekapazität auf das Reichweitenverhalten der Fahrzeuge abschätzen. So lässt sich auch der Einfluss eines Kapazitätsverlustes der Batterie durch Alterung auf die Reichweite bestimmen.



**Abbildung 55: Parametervariation Batteriekapazität**

Neben der Simulation der Reichweite lässt sich auch berechnen, wie lange mit einer konstanten Geschwindigkeit gefahren werden kann bis die Batterie leer ist (Abbildung 55). Mit konstant 200 km/h würde sich die Reichweite auf 50 km reduzieren und das Vergnügen wäre nach 15 Minuten vorbei. Dies macht deutlich, dass man mit einem Elektrofahrzeug seine Fahrweise in besonderer Weise an die geplante Fahrstrecke anpassen muss.

#### 2.6.4. Festlegung des 2WD Antriebssystems

Bei der Auswahl des 2WD Antriebssystems wurden u.a. folgende Auswahlkriterien berücksichtigt:

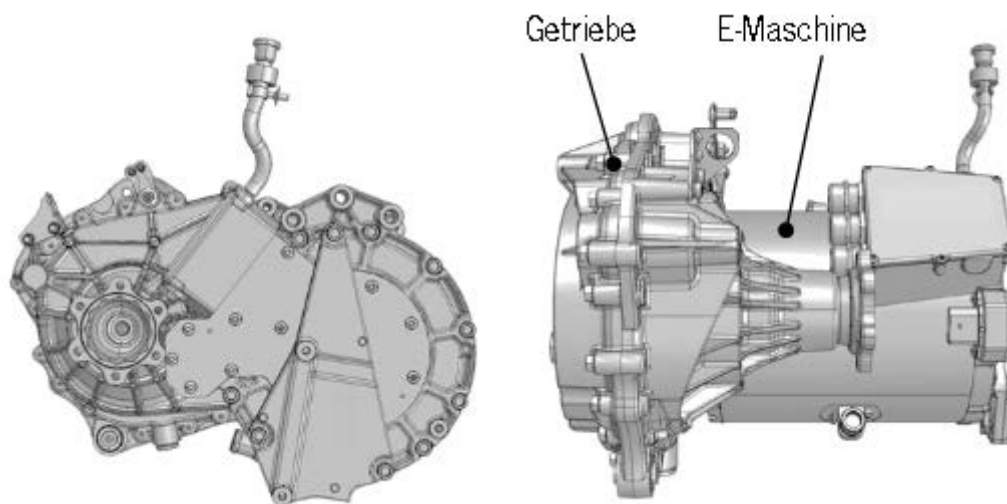
- Wirkungsgrad
- Leistung
- Kosten
- Package
- Gewicht
- Verfügbarkeit



- Robustheit
- Akustik
- Mehrfachnutzung/ Baukasten

Ausgewählt wurde ein Antriebssystem (Abbildung 56) mit folgenden Merkmalen:

- Permanenterregte Synchronmaschine (PSM)
- Flanschverbindung zwischen EM und Getriebe
- 1-Gang, Dreiwellengetriebe in Stirnradbauweise mit Kegelraddifferential
- zweiteiliges Getriebegehäuse
- achsparallele Lage von EM-Achse und Abtriebswellenachse
- Kegelrollenlagerung für alle Wellenlagerungen
- Tauchschmierung



**Abbildung 56: Elektrische Antriebseinheit**

Ein Unterscheidungsmerkmal bei elektrischen Antriebseinheiten ergibt sich aus den folgenden Bauformen:

- *integrierte Bauform*: EM- und Getriebekomponenten nutzen mindestens ein gemeinsames Gehäuseelement, eine Flanschverbindung zwischen EM und Getriebe existiert nicht
- *separate Bauform bzw. Flanschlösung*: EM und Getriebe verfügen über eigene Gehäuse und werden mittels einer Gehäuseflanschverbindung zu einer Antriebseinheit verbunden, es existiert eine eindeutige Schnittstelle zwischen den beiden Antriebskomponenten

Eine *Flanschverbindung* zwischen EM und Getriebe wird, im Vergleich zu einer integrierten Lösung, für diese Entwicklungsphase als vorteilhaft angesehen. Hierdurch existiert eine eindeutige Schnittstelle zwischen EM und Getriebe. Beide Baugruppen verfügen, sofern erforderlich, über ein eigenes Dichtungskonzept, Wartungsarbeiten bzw. Reparaturen werden hierdurch deutlich vereinfacht.

Für eine Serienanwendung würde eine integrierte Bauform folgende Vorteile gegenüber der Flanschlösung bringen:

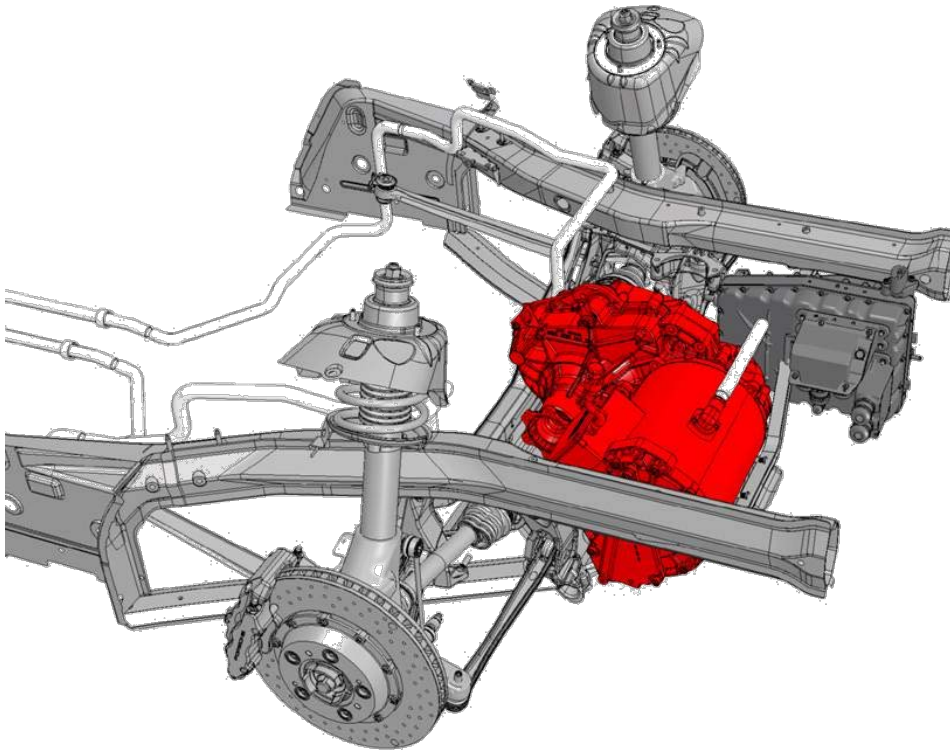
- weniger Gehäuseteile
- gesteigerte Gehäusesteifigkeit → Basis für gute Akustik
- reduziertes Gewicht
- weniger Dichtstellen bzw. Dichtelementen
- kürzere Toleranzmaßketten →
  - Einzeltoleranzen können aufgemacht werden und/oder
  - Genauigkeit kann erhöht werden
- besserer Wirkungsgrad durch reduzierte Anzahl an Radialwellendichtringen und Wellenlagern
- reduzierte Kosten

Durch die Dreiwellenkonstruktion des 1-Gang Getriebes mit zwei Stirnradstufen kann die festgelegte Getriebeübersetzung von  $i = 9,81$  auf beide Stirnradstufen verteilt werden. Hierdurch ergeben sich günstige Einzelübersetzungen. Außerdem wird eine eventuelle Anpassung der Gesamtübersetzung, durch Anpassung der Einzelübersetzungen, in einem relativ weiten Bereich und mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich. Für eine Mehrfachnutzung bzw. für die Darstellung eines Baukastensystems, wie z.B. 2WD und 4WD Anwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen, ist dies eine gute Voraussetzung.

Getriebe dieser Bauart haben erfahrungsgemäß einen guten bis sehr guten Wirkungsgrad, da:

- nur zwei Verzahnungseingriffe bzw. zwei Rad Paare
- guter Wirkungsgrad von Stirnradverzahnungen
- nur drei Radialwellendichtringe (1 x Getriebeeingangswelle, 2 x Getriebeausgangswellen)
- Tauchschmierung und somit keine Ölpumpe erforderlich

Die ursprüngliche Drehrichtung der elektrischen Antriebseinheit bei Vorwärtsfahrt entspricht jener, wie sie an der Vorderachse vorliegt (siehe Darstellung 4WD). Für den Einsatz an der Hinterachse musste die Antriebseinheit aus Package Gründen um  $180^\circ$  gedreht eingebaut werden. Die elektrische Drehrichtung ändert sich hierdurch entsprechend. Im 4WD-Fahrzeug kommt jedoch an Vorder- und Hinterachse die gleiche Leistungselektronik zum Einsatz. Um die geänderte Drehrichtung nicht softwareseitig darstellen zu müssen, wurden an der Hinterachse die Phasen (U, V, W) der EM getauscht.

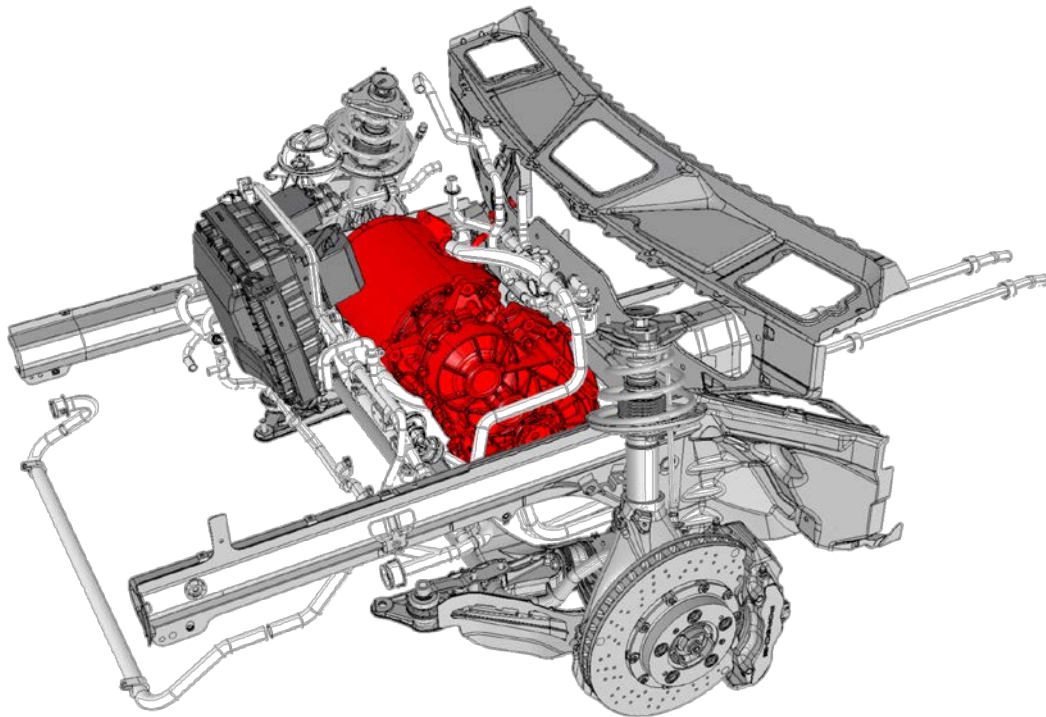


**Abbildung 57: Hinterachse mit E-Antriebseinheit**

#### 2.6.5. Festlegung des 4WD Antriebssystems

Die Antriebseinheit der 2WD-Variante stellt die Basis der 4WD Variante dar (Baukastenansatz). Wie bereits beschrieben wurde, wurde für die 4WD Variante zugunsten der Höchstgeschwindigkeit eine Anpassung der Gesamtübersetzung auf  $i = 6,9$  vorgenommen. An der Hinterachse entsprechen Einbaulage und Aggregatelagerung jener des 2WD Fahrzeuges.

Im Package des Vorderwagens ist die Lösung des Hinterwagens nicht darstellbar. Die Antriebseinheit musste um  $60^\circ$  um die Antriebswelle der EM gedreht werden. Die Einbaulage an der Vorderachse zeigt Abbildung 58.



**Abbildung 58: Vorderachse mit E-Antriebseinheit**

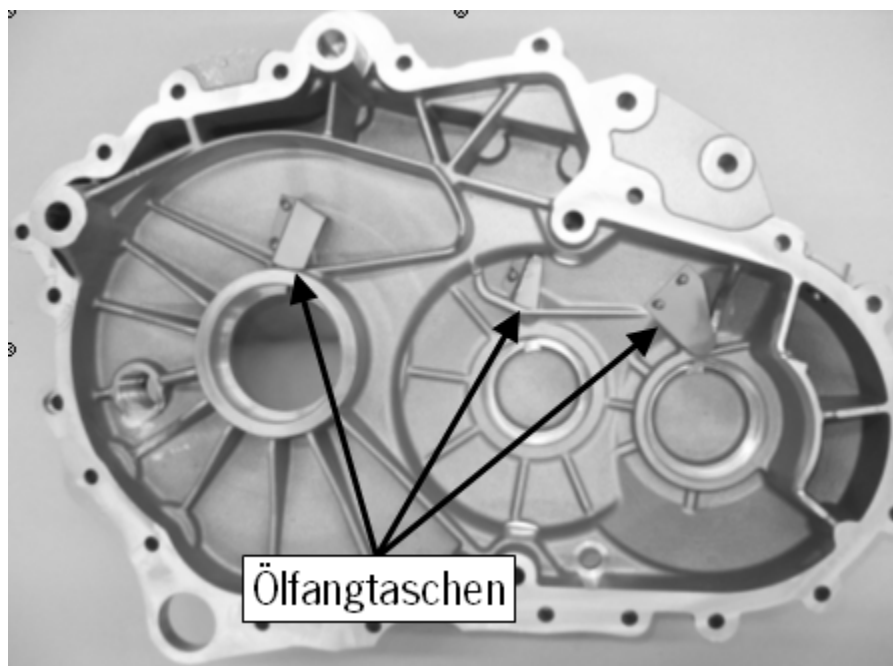
Dazu mussten folgende Änderungen vorgenommen und Kompromisse eingegangen werden:

- Nacharbeit der Getriebegehäuse für Freigang zur Karosserie
- neues Beölungskonzept mit externer elektrischer Ölpumpe
- Beölungsversuche zur Absicherung des Beölungskonzeptes
- große Beugewinkel der Achsseitenwellen (für Serie nicht geeignet)
  - reduzierte Lebensdauer der Gleichlaufgelenke
  - schlechter Wirkungsgrad der Gleichlaufgelenke
- eingeschränktes Rekuperationsvermögen mangels Freigang zur Karosserie
- Nacharbeit der Getriebegehäuse für Freigang zur Karosserie

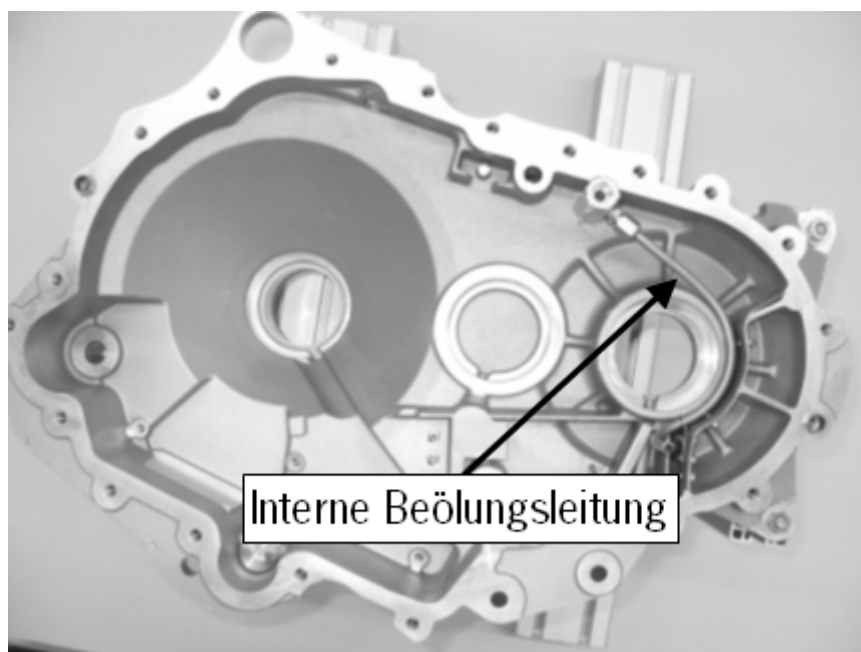
#### Anpassung Beölungskonzept Getriebe

Die neue Winkellage der Antriebseinheit an der Vorderachse hat eine hohe Einbaulage von Motorwelle, Getriebeeingangswelle und Zwischenwelle zur Folge, ein Eintauchen dieser Komponenten in den Ölsumpf findet nicht mehr statt was eine unzureichende Schmierung zur Folge hat.

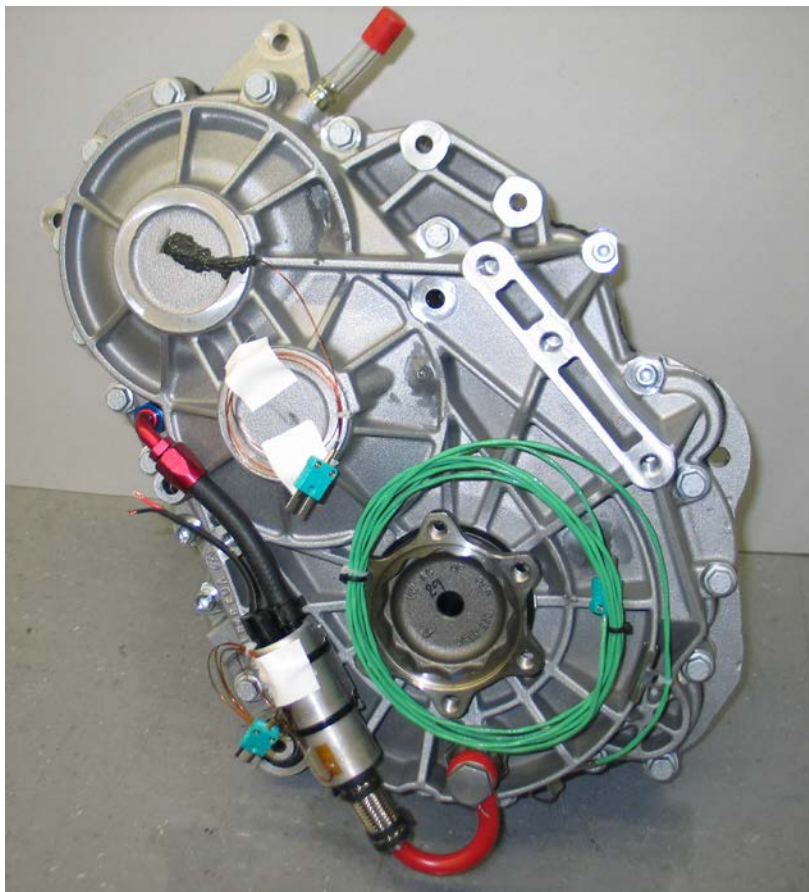
Abhilfe dafür wurde durch die Erweiterung des Beölungskonzeptes um eine elektrische Ölpumpe geschaffen. Außerdem wurden sämtliche ölführende Teile, wie z. B. Gehäuserippen, Öltaschen, Bohrungen, Nuten etc., an die geänderten Gegebenheiten angepasst. Die Umsetzung dieser Maßnahmen ist in Abbildung 59, Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 dokumentiert:



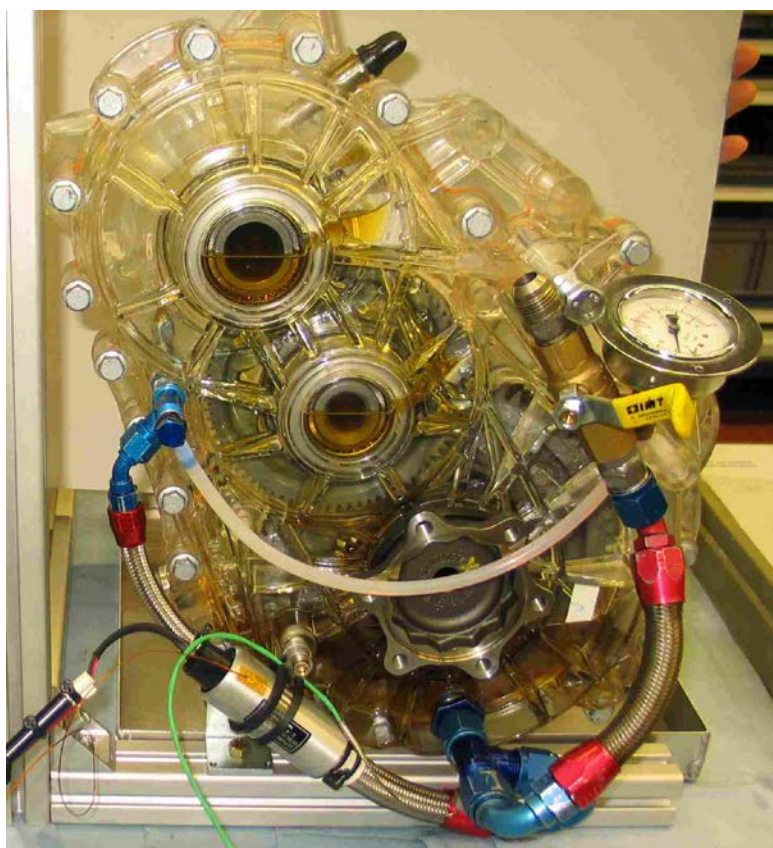
**Abbildung 59: Beölungsmaßnahmen Gehäuse 1**



**Abbildung 60: Beölungsmaßnahmen Gehäuse 2**



**Abbildung 61: Getriebe mit externer Ölpumpe für Einsatz an Vorderachse**

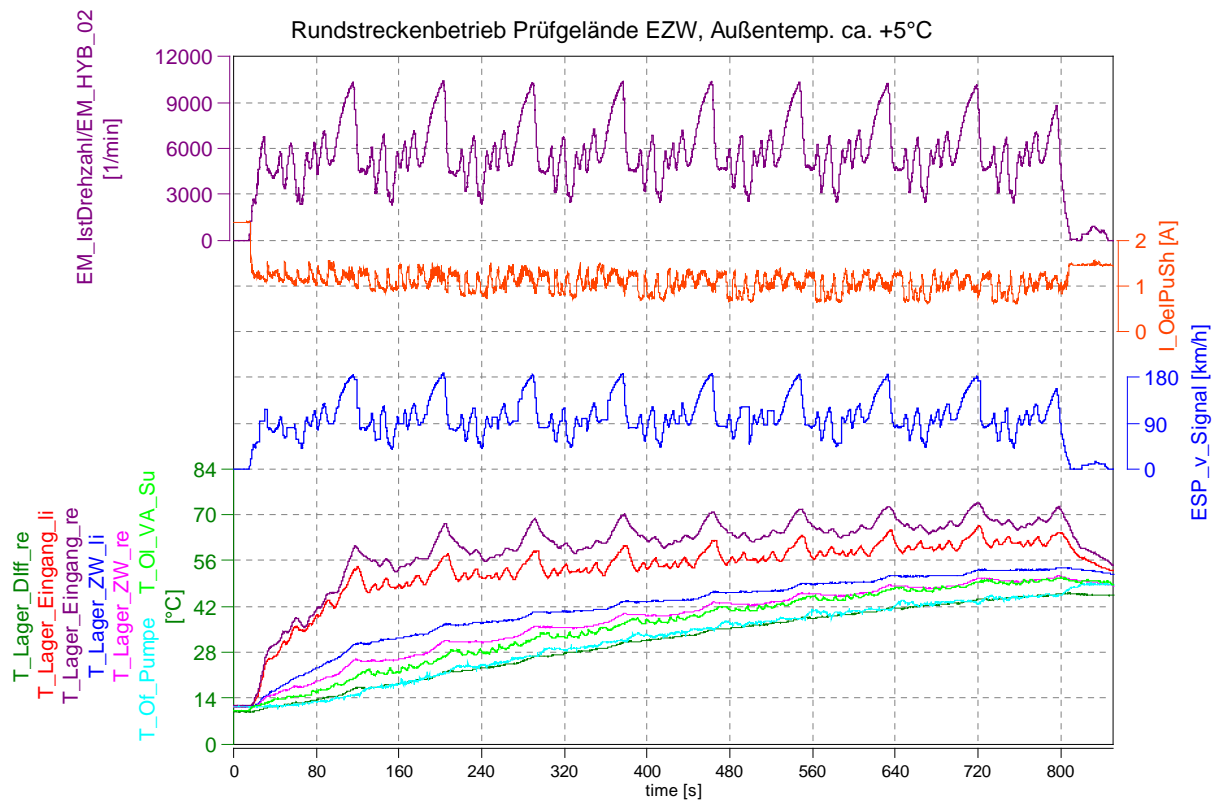


**Abbildung 62: Glasgetriebe für Beölungsversuche**

## Thermische Optimierungsmaßnahmen an der Vorderachseinheit

Im Laufe der Erprobung wurde eine deutliche Temperaturerhöhung im Bereich der Getriebeeingangswellenlager festgestellt, was auf eine unzureichende Beölung dieser Lager im Fahrzeugbetrieb schließen lässt.

Die Ölmenge im Vorderachsgetriebe wurde daraufhin von 1,2 Liter auf 1,4 Liter erhöht. Zudem wurde ein optimiertes Öl verwendet. Des Weiteren wurde die elektrische Ölpumpe im Getriebe auf dauerhafte Förderung umbedatet (bis dato wurde sie bei Geschwindigkeiten über 40 km/h abgeschaltet). Abbildung 63 zeigt eine Messung auf dem Prüfgelände Weissach im Rundstreckenbetrieb mit hoher Belastung und modifizierter Beölung. Durch beide Maßnahmen konnte die Öltemperatur im Sumpf (T\_OI\_VA\_Su) und insbesondere an den oberen Lagerstellen (T\_Lager\_Eingang\_re bzw. T\_Lager\_Eingang\_li) abgesenkt werden. Abbildung 64 zeigt eine identische Messung vor den eingebrachten Maßnahmen. Der Temperaturunterschied an den genannten Lagerstellen beträgt ca. 8-12 K und bestätigt die Wirksamkeit der Beölungsmaßnahmen.



**Abbildung 63: Temperaturmessung mit geänderter Beölung**

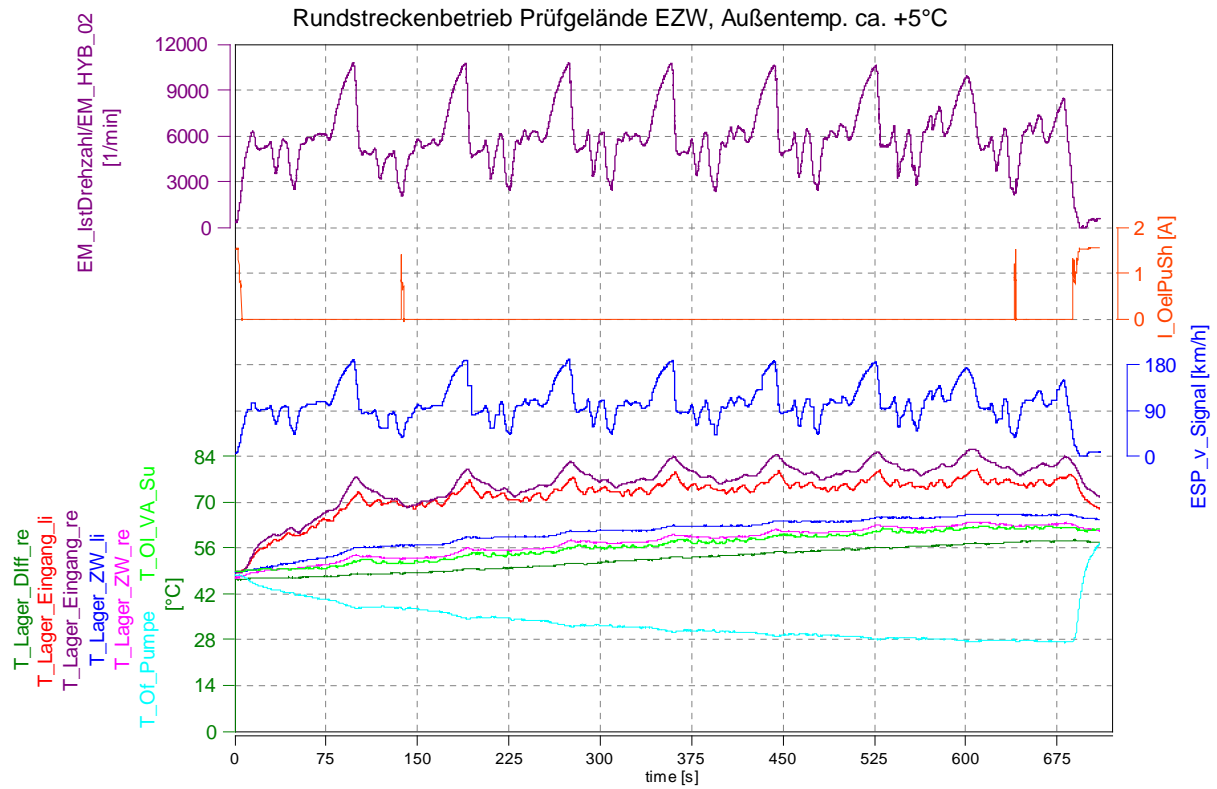


Abbildung 64: Temperaturmessung mit ursprünglicher Beölung

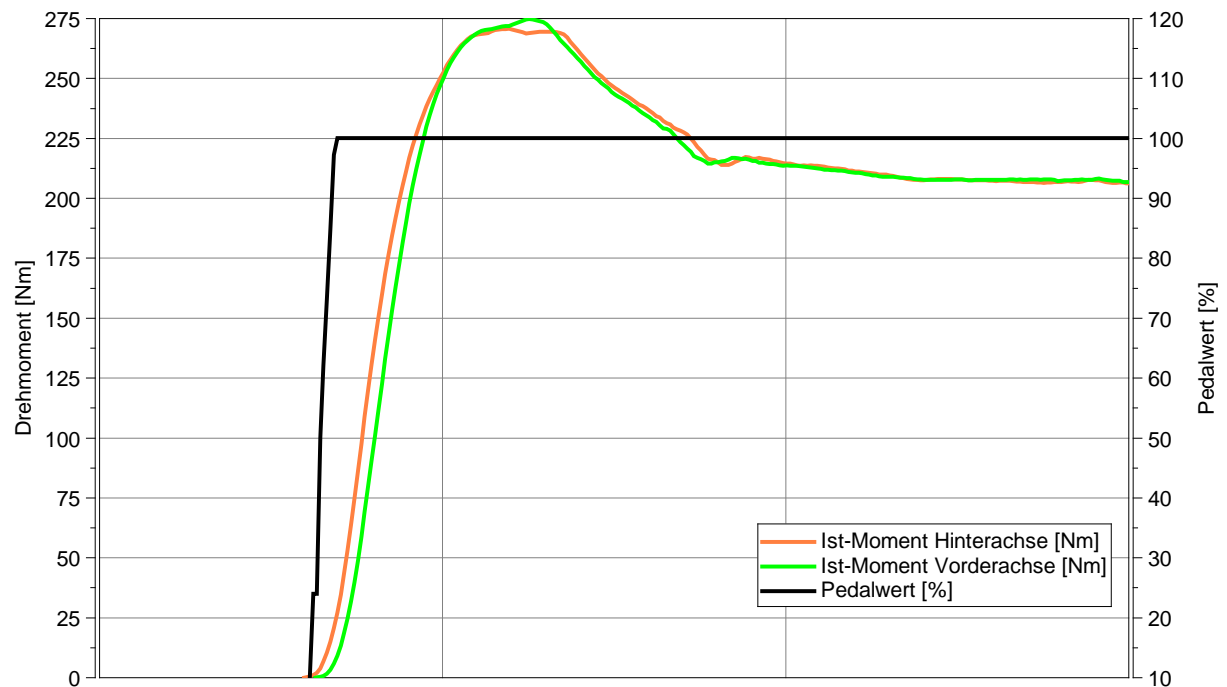


Abbildung 65: Deratingverhalten der beiden E Maschinen



## **2.7. Klimatisierung, Sicherheitskonzept**

Die Zielstellung im Arbeitspaket Klimatisierung bestand darin, ein vollwertiges Heiz- und Klimatisierungssystem für den Fahrzeuginnenraum sowie ein variables, effizientes Batteriekühlsystem in Abstimmung mit den entsprechenden Schnittstellen darzustellen.

### 2.7.1. Heizsystem

In einem konventionellen Fahrzeug kann der Fahrzeuginnenraum mit Hilfe der Abwärme des Verbrennungsmotors jederzeit komfortabel geheizt werden. In einem Elektrofahrzeug existiert keine vergleichbare Wärmequelle. Trotzdem muss das Heizsystem den gleichen Komfort wie ein konventionelles Fahrzeug bieten.

Um ein möglichst effizientes Heizsystem darzustellen, müssen vorhandene Wärmequellen genutzt werden. Somit wurde in Abstimmung mit der Aggregatekühlung im Rahmen eines gesamtheitlichen Thermomanagements ein Fluidkreislauf neu konzipiert und ausgelegt. In Abhängigkeit vom Fahrzyklus bzw. der Fahrzeugbelastung fallen in der EM und im Pulswechselrichter Abwärmen an, die aber grundsätzlich nicht zur Aufheizung des Fahrzeuginnenraums ausreichen. Somit wurde zusätzlich ein HV-Zuheizer (wasserseitig) in den Fluidkreislauf integriert. Um einen möglichst effizienten Einsatz dieses HV-Heizers zu gewährleisten, wurde ein separater Inselkreislauf, bestehend aus einer elektrischen Wasserpumpe, dem HV-Heizer, einem Umschaltventil und dem Klimagerät in den Aggregate-Fluidkreislauf integriert.

Im Blick auf die Heizleistung müssen Anforderungen in Bezug auf den Kühlmittelvolumenstrom und die Vorlauftemperatur für den Heizungswärmetauscher gewährleistet werden. Diese Anforderungen können von einem konventionellen Fahrzeug übertragen werden und sind somit bekannt. Jedoch wurden die Komponenten wie z.B. die elektrischen Wasserpumpen entsprechend den Gegebenheiten (Leitungslängen/-querschnitte, Druckabfälle Aggregate) neu definiert.

Auch das Regelkonzept zur Ansteuerung der Komponenten zur Innenraumheizung musste unter Beachtung der Wechselwirkung mit der Aggregatekühlung angepasst werden.

Wesentliche Inhalte Funktionsentwicklung Heizungsregelsystem:

- Regelung Temperatur HV-Zuheizer
- Ansteuerung elektrische Wasserpumpe im Inselkreislauf
- Applikation Systemreaktion bei Sollwertsprüngen

#### Wesentliche Erkenntnisse zum Heizsystem

Die Ansprechzeit des HV-Zuheizers ist gegenüber der eines Verbrennungsmotor in der Regel im Vorteil. Somit kann eine schnelle Innenraumaufheizung gewährleistet werden. Die installierte Heizleistung von 5 kW kann nicht unter allen Bedingungen den gleichen Komfort bieten wie in einem konventionellen Fahrzeug. Die Leistungsgrenze lag etwa bei Temperaturen um ca. -10°C. Das Regelkonzept musste komplett neu appliziert werden.

Im Boxster e kommt (wie im Basisfahrzeug) ein wasserseitig geregeltes Klimagerät zum Einsatz. In einem konventionellen Klimagerät steht immer ausreichend Abwärme und somit eine entsprechende Vorlauftemperatur am Heizungswärmetauscher bereit. Über die Mischluftklappe im Klimagerät kann der Luftstrom bedarfsgerecht erwärmt werden. Bei einem E-Fahrzeug wird das Kühlwasser aus Effizienzgründen bedarfsgerecht auf eine entsprechende Temperatur gebracht bzw. gehalten. Bei einem Sollwertsprung nach oben kann bei einem konventionellen Fahrzeug die Stellung der Mischluftklappe und das Gebläse sehr schnell nachgeregelt werden, da die Wärme permanent bereit steht. Beim Elektrofahrzeug musste die Systemreaktion neu appliziert werden, da z.B. bei einem Sollwertsprung nach oben zuerst die Vorlauftemperatur durch den HV-Zuheizer entsprechend angehoben werden musste, bevor das Gebläse nachgeregelt wird.

### 2.7.2. Kältekreislauf Klimaanlage

Im konventionellen Mittelmotor-Boxster wird der mechanische Kältemittelverdichter über den Verbrennungsmotor vor der Hinterachse angetrieben. Aufgrund der Lage der Komponenten im Fahrzeug ergeben sich relative lange Klimaleitungen mit den entsprechenden Druckverlusten und den damit verbundenen Effizienznachteilen. Im Boxster e konnte der elektrische Kältemittelverdichter im Vorderwagen angeordnet und so Leitungsverluste signifikant reduziert werden. Die Herausforderung dabei bestand in der Konzeptentwicklung einer karosseriefesten Anbindung des elektrischen Kältemittelverdichters inklusive einer Entkopplung zur Vermeidung von Körperschallübertragungen (siehe Kapitel 2.3.2).

Abgesehen von der Position des Kältemittelverdichters im Fahrzeug und der Integration eines Kältemittel-/Kühlmittelwärmetauschers (Chiller) zur HV-Batteriekühlung konnte der Kältekreis vom konventionellen Fahrzeug übernommen werden. Somit konnte grundsätzlich die Leistungsfähigkeit abgesichert und die Effizienz verbessert werden. Das Systemverhalten änderte sich gegenüber einem konventionellen Fahrzeug in Bezug auf Drücke und Stabilität nicht.

Wesentliche Inhalte der Funktionsentwicklung Kältekreis:

- Ansteuerung elektrischer Verdichter
- Ansteuerung von Absperrventilen im Kältekreis
- Regelung HV-Batteriekühlung im Chiller-Betrieb

#### Wesentliche Erkenntnisse zum Kältekreislauf

- Körperschallentkopplung von der Karosserie notwendig (siehe Kapitel 2.3.2)
- Effizienzvorteile aufgrund geringerer Leitungsverluste
- keine Leistungs Nachteile in Bezug auf die Kälteleistung
- keine Änderungen im Systemverhalten bzgl. Stabilität

### 2.7.3. HV-Batteriekühlung

Einen weiteren Schwerpunkt im Arbeitspaket bildeten die Konzeption und die Umsetzung eines Fluidkreislaufs zur HV-Batteriekühlung, der auch bei sehr hohen Außentemperaturen in der Lage ist, entsprechende Vorlauftemperaturen sicher zu stellen.

Um diese Anforderung zu gewährleisten, wurde ein variabler Niedertemperaturkreislauf (NT) mit einem Luft-/Wassermetauscher im Frontend und einer Schnittstelle zum Kältekreislauf der Klimaanlage konzipiert. Diese Schnittstelle bildet ein Kältemittel-/Kühlmittelwärmetauscher (Chiller), der in den entsprechenden Lastfällen bei mittleren bis hohen Außentemperaturen Wärme aus dem NT-Kühlmittelkreislauf in den Kältemittelkreislauf abführen kann. Grundsätzlich erfolgt die Kühlung der HV-Batterie über den NT-Kühler im Frontend. Erst wenn dieser Kühler, aufgrund der Umgebungsbedingungen bzw. seiner Leistungsfähigkeit, keine entsprechenden Vorlauftemperaturen für HV-Batterie mehr gewährleisten kann, wird über ein Umschaltventil der Chiller aktiviert. In diesem Fall muss der Kältekreis der Klimaanlage zwei „Verbraucher“ abdecken, d.h. bei der Auslegung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems muss dieser Umstand berücksichtigt werden. Grundsätzlich stehen ca. 8kW Kälteleistung zur Verfügung. Diese Kälteleistung muss in den entsprechenden Lastfällen anforderungsgemäß „aufgeteilt“ werden. Dadurch entstehen zum einen Zielkonflikte und zum anderen Wechselwirkungen, da z.B. bei sehr hohen Außentemperaturen sowohl der Fahrzeuginnenraum als auch die HV-Batterie gleichzeitig hohe Leistungsanforderungen an den Kältekreislauf der Klimaanlage haben. Somit wurde die Applikation der Regelung so gestaltet, dass der bestmögliche Kompromiss erreicht werden konnte.

Die Gegebenheiten in Bezug auf die Anordnung der Komponenten des NT-Kühlkreises im Fahrzeug stellte grundsätzlich keine optimale Voraussetzung zur effizienten Kühlung der HV-Batterie dar. Die HV-Batterie wurde im Bauraum des Verbrennungsmotors vor der Hinterachse untergebracht, der NT-Kühler befindet sich im Frontend, der Chiller wurde, um die Leitungsverluste im Kältekreis gering zu halten, an der A-Säule unter dem Kotflügel platziert. Aus diesen Umständen resultieren relative lange Kühlmittleitungen, die im Schwellerbereich von vorn nach hinten zur HV-Batterie geführt wurden. Dadurch ergeben sich zum einen Druckverluste und zum anderen besteht die Möglichkeit, dass Wärme in die Leitungen eingetragen wird. Somit bestand ein Erprobungsschwerpunkt darin, Erkenntnisse bezüglich möglicher Effizienzverluste zu erlangen.

Die umfangreichen, neuen Funktionalitäten mit dem bestehenden Klima-Steuergerät abzudecken, war nicht möglich. Es war erforderlich, ein zusätzliches Rapid-Prototyping-Steuergerät (RPT) mit Gateway-Funktionen in die EE-Architektur zu integrieren und die entsprechende Software zu beschreiben bzw. zu spezifizieren. Somit bildete sowohl die Applikation der Software des RPT-Steuergeräts als auch die Anpassung der bestehenden Software des Klimasteuergeräts einen umfangreichen Schwerpunkt.

## Wesentliche Erkenntnisse zur HV-Batteriekühlung

- Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems war gegeben, d.h. die HV-Batterie und der Innenraum konnten bedarfsgerecht gekühlt werden
- der im Boxster e konzipierte Fluidkreislauf und dessen Regelung (Softwareapplikation) zur HV-Batteriekühlung bilden die Grundlage für alle weiteren Porsche-Projekte im Bereich E-Mobilität
- das variable Kühlsystem mit vielen Freiheitsgraden in Bezug auf die Regelung trägt zur Effizienzerhöhung und somit zur Reichweitenoptimierung bei
- weitere Effizienzerhöhung durch Isolation von Kühlmittleitungen im Schwellerbereich möglich und nötig, aber nicht zur Gewährleistung der Funktion erforderlich

### **2.8. Bordnetz mit DC/DC Wandler**

Durch die komplexe Wechselwirkung der hochspannungsführenden Bauteile mit der 12V-Verkabelung, die Anzahl an HV-Verbrauchern und -Komponenten und die Verteilung über das gesamte Fahrzeug ist, speziell bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen, eine Konzeptbestätigung durch Simulation und Versuchsträger in einer sehr frühen Projektphase erforderlich.

Der Antrieb eines Fahrzeuges durch Elektromotoren erfordert hohe elektrische Leistungen, die mit einem herkömmlichen 12V Bordnetz nicht realisiert werden können.

Für das rein elektrische Fahren wurden die Hochvoltkomponenten wie:

- Traktionsbatterien
- Leistungselektroniken
- Klimakompressor
- Hochvolt Zuheizer (PTC) für den Innenraum
- E - Maschinen
- Ladedose
- On Board Lader (OBL)

im Fahrzeug positioniert und verschaltet. Traktionsbatterie und Elektromotoren arbeiten unter Hochspannung von bis zu 400 Volt und häufig mit sehr hohen Strömen von bis zu 450A. Für diese Anforderungen wurde eine neue Elektrik-Architektur erarbeitet. Eine Simulation anhand eines Brettbaus ermöglichte die Überprüfung der Funktionsfähigkeit vorab.

Auch das 12V Bordnetz musste an die geänderten Anforderungen angepasst werden. Da es sich beim Basisfahrzeug um ein aktuelles Serienfahrzeug handelt, wurden hier die neuen Komponenten und Steuergeräte in die bestehende Architektur und CAN Vernetzung eingebunden. Sämtliche bisher durch den Verbrennungsmotor angetriebenen Nebenaggregate werden durch Elektromotoren angetrieben. Auch dazu wurden neue Schalt- und Verkabelungskonzepte erarbeitet.

Die Versorgung des 12V Bordnetz erfolgt über die Integration eines DC/DC-Spannungswandlers. Dieser stellt die Energie für das 12V Bordnetz durch Umwandlung der Hochspannung der EM in Gleichspannung zur Verfügung.

Für die Versorgung der HV Komponenten wurden spezielle Hochvoltleitungen in den bestehenden Bauraum so integriert, dass eine Beschädigung dieser ausgeschlossen und die Störeinflüsse auf das bestehende Bordnetz so gering wie möglich sind.

Folgende Umfänge wurden umgesetzt:

#### 1. HV Leitungen / Komponenten :

- Integration der HV - Leitungen im bestehenden Bauraum
- Erstellung von Arbeitsanweisungen für die Konfektion von HV Leitungen innerhalb der PAG bei Prototypaufbauten
- Kontrolle und Absicherung der Kontaktierung über Dauerläufe und nicht zerstörende Analyse wie Röntgen
- Ausarbeitung eines Pilotlinienkonzeptes und Darstellung in den Schaltplänen
- Masse- und Potentialausgleichsleitungen

#### 2. Bretttaufbau

- Erstellung eines Brettbaus mit allen Umfängen eines 4WD Fahrzeuges inkl. Hochvoltkomponenten
- Abprüfung der Verschaltungsänderungen auf korrekte Funktion
- Aufbau eines Hochvoltverteilers zur Versorgung von 2 E- Maschinen, Notwendig zur Simulation der Allradsteuerung

#### 3. 12 Volt Bordnetz:

- Erstellung von Schaltplänen und Absicherungskonzepten mit allen neuen Komponenten
- Ausarbeitung einer CAN- Vernetzung für alle neuen Busse wie Hybrid- und Antriebs-CAN
- Modifikation des gesamten Bordnetzes
- Auswahl und Festlegung von sämtlichen Stecksystemen für den Umbau

#### 4. Ladefunktion

- Integration der Ladedose und des Ladergeräts ins Fahrzeug
- Fertigung einer Verteilerdose zur Erweiterung der Lademöglichkeit über ein externes Schnellladegerät

## 2.9. Anzeigen

### 2.9.1. Reichweitenassistent im Boxster e

#### Systembeschreibung:

Sowohl Elektro- als auch Plug-In Hybrid-Fahrzeuge besitzen aufgrund ihres begrenzten Energieinhalts der Traktionsbatterie eine beschränkte elektrische Reichweite, die im Vergleich zum bekannten konventionellen Fahrzeug wesentlich geringer ist. Darüber hinaus reduzieren elektrische Bordnetzverbraucher diese Reichweite zusätzlich. Die Verlässlichkeit der dargestellten elektrischen Restreichweite gewinnt bei Elektro- und Plug-In Fahrzeugen im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen erheblich an Bedeutung, da ein Ladevorgang bis zu mehreren Stunden andauern kann und die Infrastruktur zumindest aktuell hinsichtlich Schnellladeverfahren unzureichend ausgebaut ist. Daher benötigt der Fahrer zur Planung seiner Route eine präzise Information über die mögliche elektrische Restreichweite seines Fahrzeugs.

Der Reichweitenassistent stellt ein Fahrerassistenzsystem für Elektro- und Plug-In Hybrid-Fahrzeuge dar. Er dient dem Fahrer zur Planungssicherheit und nimmt somit Reichweitenängste.

Es wurde ein neuer und innovativer Algorithmus zur Reichweitenberechnung erforscht, welcher sich grundlegend zu bisher bekannten Algorithmen unterscheidet.

Bisherige Berechnungsverfahren berücksichtigen lediglich die Verbrauchshistorie des Verbrennungsmotors als Grundlage zur Reichweitenermittlung. Hierdurch ist die Güte je nach aktueller Fahrweise und aktuellem Komfortbedarf für Klimatisierung stark limitiert. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist, dass bei Elektrofahrzeugen der Speicherinhalt während der Fahrt durch Rekuperation temporär wieder geladen werden kann. Beim konventionellen Fahrzeug hingegen findet eine kontinuierliche Entladung des Tankinhalts statt.

Auch Einflüsse von Nebenverbrauchern wurden bisher nicht berücksichtigt, da beim konventionellen Fahrzeug die Heizleistung als Abwärme vom Verbrenner direkt genutzt wird und hierdurch kein zusätzlicher Energiebedarf entsteht. Beim Kühlen sind die Leistungsanteile des mechanischen Klimakompressors aufgrund des relativ geringen Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors im Vergleich gering und werden daher im bisherigen Berechnungsverfahren nicht separat berücksichtigt.

Da bei Elektrofahrzeugen die Nebenverbraucher einen wesentlich höheren Einfluss auf die Reichweite besitzen, werden im innovativen Algorithmus sämtliche elektrische Verbraucher berücksichtigt (Antrieb, Klimakompressor, PTC-Heizung, Bordnetz). Daher besitzt der innovative Algorithmus eine sehr hohe Güte im Vergleich zur konventionellen Berechnung bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Darüber hinaus wird der Klimatisierungsbedarf in Abhängigkeit der aktuellen Außentemperatur direkt zu

Fahrtbeginn prädiktiv abgeschätzt. Dies gewährleistet eine präzise Restreichweitenermittlung direkt ab Fahrtbeginn. Der Verbrauchsanteil für Traktion wird weiterhin rein historienbasiert ermittelt, da keine prädiktiven Streckeninformationen (Höhenprofil, Geschwindigkeitslimits) seitens des Navigationssystems zur Verfügung stehen.

Zusätzlich zur Restreichweite werden durch den Reichweitenassistenten Hilfestellungen für eine mögliche Reichweitenverlängerung gegeben. Auch die aktuellen Energieflüsse werden dem Fahrer dargestellt, um ihn hinsichtlich des Energieverbrauchs zu sensibilisieren.

Kernbestandteile des Reichweitenassistenten sind:

- Ermittlung einer präzisen Reichweite unter Berücksichtigung aller relevanten Verbraucher
- Prädiktive Abschätzung des Klimatisierungsbedarfs in Abhängigkeit der aktuellen Außentemperatur zu Fahrtbeginn
- Direkte Rückwirkungen von reichweitenbeeinflussenden Fahrerhandlungen in der angezeigten Reichweite (z.B. AC off, Verdeck zu)
- Hilfestellung für reichweitenverlängernde Maßnahmen
- Darstellung des aktuellen Energiehaushalts des Fahrzeugs

### 2.9.2. Umgesetzte Funktionalitäten des Reichweitenassistenten

Neben der Berechnung der Restreichweite dienen weitere Funktionalitäten zur Planungssicherheit des Fahrers.

#### Charakteristische Referenz-Reichweite (Stadtreichweite)

Im Gegensatz zur oben beschriebenen Reichweitenberechnung, die auf Grundlage des aktuellen Verbrauchs und einer Verbrauchshistorie basiert, unterscheidet sich der Berechnungsalgorithmus für die elektrische Referenz-Reichweite darin, dass der Anteil des Traktionsverbrauchs mit einem konstanten Wert (z.B. typischer Verbrauch für Stadt, Landstraße oder Autobahn) fest gesetzt wird. Die elektrische Referenz-Reichweite ist damit unabhängig vom Fahrstil und Streckenprofil und wird nur vom aktuellen Ladezustand des Traktionsspeichers und dem variablen Stromverbrauch der Nebenverbraucher beeinflusst.

Zu den elektrischen Nebenverbrauchern gehören Klimakompressor, PTC-Heizung und DC/DC-Wandler zur Versorgung der Niedervoltverbraucher.

Der Fahrer kann somit beispielsweise bei zügiger Autobahnfahrt seine vorhandene Restreichweite bei Verlassen der Autobahnfahrt besser einschätzen, da die Referenzreichweite frei vom aktuellen Fahrverhalten und des befahrenen Streckenprofils eine weitere Orientierungshilfe bietet.

### Anzeige von reichweitenverlängernder Maßnahmen (Reichweitengewinne)

Der Berechnungsalgorithmus der Reichweitenberechnung wurde dahin gehend gestaltet, dass sich eine Verbraucher Zu- bzw. Abschaltung relevanter Komponenten sofort in der angezeigten Restreichweite und Referenzreichweite niederschlägt. Insbesondere in Kombination mit der Anzeige der Reichweitengewinne bietet diese Funktionalität den Vorteil, dass sich die Reichweite bei entsprechender Verbraucherabschaltung um den Wert des Reichweitengewinns ändert, sobald die Komponente deaktiviert wird. Somit erhält der Fahrer eine direkte Rückkopplung bei Zu- bzw. Abschalten von Nebenverbrauchern auf seine Reichweite und kann so aktiv seine Reichweite verlängern, um ein gewünschtes Fahrziel zu erreichen.

Als elektrische Verbraucher kommen hier vornehmlich der elektrische Klimakompressor, die PTC-Heizung oder auch eine optional eingebaute Sitzheizung in Betracht.

Als weitere Einflussfaktoren könnte bei Transportfahrzeugen die aktuelle Zuladung des Fahrzeugs als Reichweitengewinn in Kilometern ausgewiesen werden. Für Cabriolets kann auch bedingt durch den Einfluss des geänderten cw-Wertes ein Reichweitengewinn durch Schließen des Verdecks ausgegeben werden.

### Folgende Funktionen dienen zur Information über die Energieflüsse im Fahrzeug

#### ▪ **Durchschnittsverbrauch seit Fahrtbeginn**

Es wird der Durchschnittsverbrauch des Fahrzeugs für Traktion und alle aktiven elektrischen Nebenverbraucher seit Fahrtbeginn ermittelt. Es besteht die Möglichkeit diesen Durchschnittswert über den Lenkstockhebel zurück zu setzen (Reset-Funktion). Die Einheit wird in Kilowattstunden pro 100 Kilometer dargestellt. Dies wurde gewählt, da eine Verbrauchsangabe pro 100 Kilometer dem Fahrer bereits von konventionellen Fahrzeugen bekannt ist.

#### ▪ **Momentanverbrauch**

Eine weitere Anzeige gibt den Momentanverbrauch in Kilowattstunden pro 100 Kilometer wieder. In niedrigen Geschwindigkeitsbereichen und im Stillstand findet eine Umschaltung der Einheit in eine Angabe „Energie pro Stunde“ statt, beispielsweise in Kilowattstunden pro Stunde. Die Umschaltung erfolgt unter 10 km/h.

#### ▪ **Anteilige Verbräuche**

Zur Sensibilisierung des Fahrers hinsichtlich des Energieverbrauches, wird der Gesamtenergieverbrauch anteilig auf seine relevanten Einzelkomponenten separat dargestellt.

Diese sind Traktion, Klimaanlage, PTC-Heizung und Bordnetz (DC/DC-Wandler). Zur plakativen Darstellung kann dies vornehmlich mittels eines Kreis-Diagramms illustriert werden. Die Anzeige erfolgt in prozentualer Darstellung.



### 2.9.3. Kommunikationsschnittstelle zum Reichweitenassistenten

Zur Realisierung der oben erläuterten Funktionalitäten werden CAN-Signale der folgenden Komponenten benötigt. Eine vernetzungstechnische Kommunikation mittels CAN wurde im Fahrzeug umgesetzt.

- Batteriemanagementsystem:  
Strom, Spannung, Ladezustand, Temperierungsanforderung
- Elektrische Maschine:  
Strom, Spannung, Moment, Drehzahl
- Klimakompressor:  
Strom, Spannung, Status, Solltemperatur Innenraum, Temperatur nach Verdampfer
- PTC-Heizung:  
Strom, Spannung
- DC/DC-Wandler:  
Strom HV-Seite, Spannung HV-Seite
- ESP:  
Längsgeschwindigkeit, Längsbeschleunigung, Querschleunigung
- Außentemperatur-Sensor:  
Außentemperatur
- Ladegerät:  
Status Laden
- Kombiinstrument:  
Status Klemme\_15 aus

### 2.9.4. Umgesetztes Anzeigeconcept des Reichweitenassistenten

Der „Energiescreen“ im fahrbereiten Modus zeigt Durchschnittsverbrauch, Momentanverbrauch, Restreichweite und Referenzreichweite an (Siehe Abbildung 66). Die Einheit des Verbrauchs wurde im Projektverlauf von Wh/km auf kWh/100km zur besseren Verständlichkeit geändert. Die Reichweite wird in jeweils 1km-Schritten aufgelöst.



Abbildung 66: Energiescreen

Abbildung 67 zeigt die Darstellung ausgewählter Reichweitengewinne in Kilometern bei Abschaltung entsprechender Komponenten (wenn Komponente aktiv). Hierdurch kann dem Fahrer gezielt eine Hilfestellung zu reichweitenverlängernden Maßnahmen gegeben werden. Wenn eine Komponente nicht aktiv ist, wird die entsprechende Zeile ausgegraut. Da im Fahrzeug keine Sitzheizung verbaut ist, wird der Reichweitengewinn Sitzheizung nicht dargestellt.

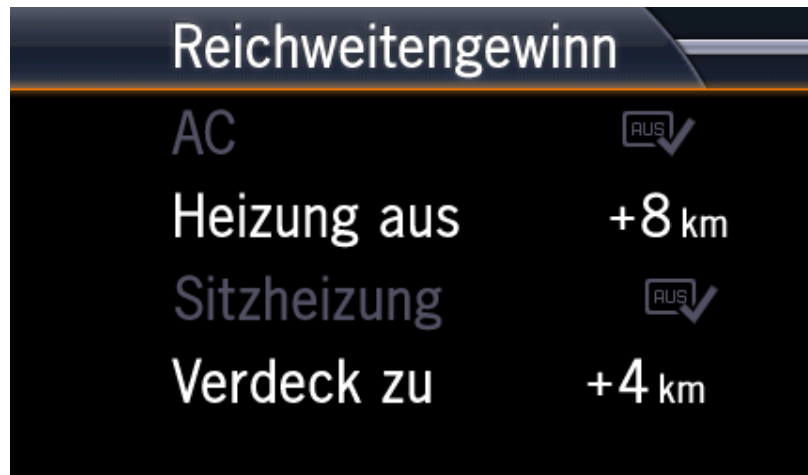


Abbildung 67: Darstellung von Reichweitengewinnen

Der „Bilanzscreen“ stellt anteilig die aktuellen Verbräuche aller relevanten Komponenten bezogen auf den Gesamtverbrauch dar (Abbildung 68). Ausgewiesen werden die Anteile für Bordnetz, Klimakompressor, PTC-Heizung und Traktion. Hierdurch wird dem Fahrer ein Überblick über den „Energiehaushalt“ des Fahrzeugs vermittelt.



Abbildung 68: Darstellung des Energiehaushalts

### **3. Erfolgskontrollbericht**

#### **3.1. Beitrag der Projektergebnisse zu den förderpolitischen Zielen**

Mobilität ist unverzichtbare Grundlage unserer Gesellschaft und Wirtschaft. Der Straßenverkehr in der EU ist zu 90 % von Mineralöl abhängig und umweltbelastende Nebenwirkungen machen Neuentwicklungen im Bereich der Mobilität notwendig.

Durch die Teilnahme am Projekt „**Großversuch Porsche Boxster e**“ im Rahmen der „Modellregion Elektromobilität Region Stuttgart“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hat Porsche dazu beigetragen, die Entwicklungen in Richtung Elektromobilität sichtbar zu machen und die Grundlage für eine spätere Serieneinführung von Elektrofahrzeugen von Porsche zu beschleunigen.

Der Aufbau von Know-how Basis in den Bereichen Kundenanforderungen und Technik für die Entwicklung marktfähiger Elektrofahrzeuge im Premiumsegment und ihre Einbindung in die neuartige Infrastruktur wurde vorangetrieben.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Folgeprojekte, bei denen schwerpunktmäßig an der Effizienzsteigerung und damit der Reichweite von Elektrofahrzeugen gearbeitet wird und auf die Kostenreduzierung bei der Herstellung von Elektrofahrzeugen besonderer Wert gelegt wird.

#### **3.2. Wichtige wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens**

##### **3.2.1. Konzept und Auslegung**

Ein Großteil der im technischen Zielsystem festgelegten Ziele und Funktionen konnten im Verlauf des Projekts in den Versuchsfahrzeugen umgesetzt und realisiert werden. So liegen die Fahrleistung des 4WD Fahrzeuges wie ursprünglich geplant auf ähnlich hohem Niveau wie das eines verbrennungsmotorisch angetriebenen Boxster S Serienfahrzeuges der aktuellen Baureihe 987 Modelljahr 2010.

In einigen Fällen wurden aber auch ursprünglich festgelegte Ziele im Verlauf des Projekts aufgrund neuer Erkenntnisse oder geänderter Randbedingungen neu definiert. So wurde beispielsweise die Entscheidung getroffen auf Grund der kurzen Projektlaufzeit auf vorhandene Antriebskomponenten aus dem VW-Konzern zurückzugreifen. Diese Entscheidung half, die Komplexität des Gesamtsystems Elektroantrieb zu reduzieren ohne dabei Nachteile für den Aufbau von neuem Know-how in Kauf zu nehmen. Bauartbedingt lassen diese Komponenten jedoch „nur“ Geschwindigkeiten bis maximal 200 km/h zu, so dass das zu Beginn des Projekts festgelegte Ziel für die Höchstgeschwindigkeit von 240 km/h auf 200 km/h geändert wurde.

Elektromotoren haben im System Fahrzeug einen besseren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren. Ein weiterer prinzipbedingter Unterschied ist die hohe Belastbarkeit für kurze Zeit von Elektromotoren, allerdings auch die hohe Differenz zur Dauerbelastbarkeit. Der komplett andere Verlauf der Vollastlinie führt zu einer völlig veränderten Fahrcharakteristik.

Der bessere Wirkungsgrad des Elektroantriebs führt zu einem wesentlich geringeren Verbrauch. Der Energiebedarf des Bordnetzes und des Klima- und Heizgeräts hat deshalb einen sehr viel größeren relativen Einfluss auf die Reichweite. Auf die Optimierung dieser Systeme ist bei einem Elektrofahrzeug großer Wert zu legen. Starke Schwankungen der Reichweite in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen sind zu erwarten.

Das Mittelmotorkonzept des Serienfahrzeuges eignet sich sehr gut für die Überführung in ein Elektrofahrzeug mit „Mittelbatteriekonzept“, das sich darüber hinaus ebenfalls durch die vorteilhafte Achslastverteilung des Serienfahrzeuges auszeichnet.

### 3.2.2. Thermomanagement

Das Kühlsystem eines vollelektrischen Fahrzeugs unterscheidet sich grundsätzlich von dem eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Neben dem bei Verbrennungsmotoren bekannten Hochtemperaturkreislauf ist ein gesonderter Niedertemperaturkreislauf für die Kühlung der HV-Batterie erforderlich.

Im **Hochtemperaturkreislauf** werden Leistungselektronik (PWR) und EM in Reihe geschaltet, da die Grenzwerte der Vorlauftemperatur zur Leistungselektronik niedriger sind als die der EM. Vorder- und Hinterachse der Antriebsblöcke werden parallel geschaltet.

Die Abwärme dieser Komponenten wird je nach Fahrsituation entweder zur Beheizung des Innenraums eingesetzt oder über die Wärmetauscher im Fahrzeugbug an die Umgebung abgegeben.

Zur Sicherstellung der Innenraumbeheizung wird über ein Ventil die Möglichkeit eines Inselkreislaufs dargestellt, in dem über eine separate Pumpe und einen elektrischen Zuheizer (PTC) der Innenraum beheizt werden kann.

Der **Niedertemperatur-Kreislauf (NT)** für die HV-Batterie ist so aufgebaut, dass bei niedrigen Umgebungstemperaturen bzw. bei geringem Kühlbedarf die Kühlung über einen Wärmetauscher im Fahrzeugbug dargestellt wird.

Wenn die Vorlauftemperatur zur Batterie zu hoch wird, wird zur zusätzlichen Kühlung der Klimakompressor mit eingebunden. Über einen so genannter „Chiller“ wird zusätzlich Wärme über den Kältemittelkreislauf abgeführt.

### 3.2.3. Akustik

Anhand der Ergebnisse aus drei Systemen zur Geräuschanreicherung konnte festgestellt werden, dass das komplexe, auf einem Sampleplayer basierende System nicht den erhöhten Hardware-Aufwand rechtfertigt. Das einfache, auf harmonischen Signalen basierende System erzeugt bereits eine durchaus attraktiv klingende Geräuschkulisse.

Bei einem ausreichend leistungsfähigen Außengeräuschanreicherungssystem kann in einem akustisch relativ offenen Fahrzeug wie dem Porsche Boxster auf das zusätzliche System zur Innengeräuschanreicherung verzichtet werden.

Für das einfache Sound-System gilt:

- Die Außenlautsprecherbox muss an einen günstigeren Einbauort verlegt werden, zumindest muss eine akustische Öffnung nach außen geschaffen werden, ggfs. ist die Verstärkerleistung anzupassen.
- Der Einbauort für den Innenraumshaker ist zu optimieren, der aktuelle Anbringungsort ist zu steif und strahlt zu wenig Schall in den Innenraum ab.
- Die Bedatung ist stärker zu emotionalisieren.

#### Karosserieschwingungsverhalten

Das Elektrofahrzeug zeigt im Vergleich zum Serienfahrzeug bei weitem noch nicht dieselbe Abstimmqualität. Die Beschleunigungsamplituden sind im Bereich der ersten globalen Karosserietorsionsresonanzfrequenz um rund 75% höher, die Resonanzfrequenz sinkt um rund 3 Hz auf ca. 16 Hz ab.

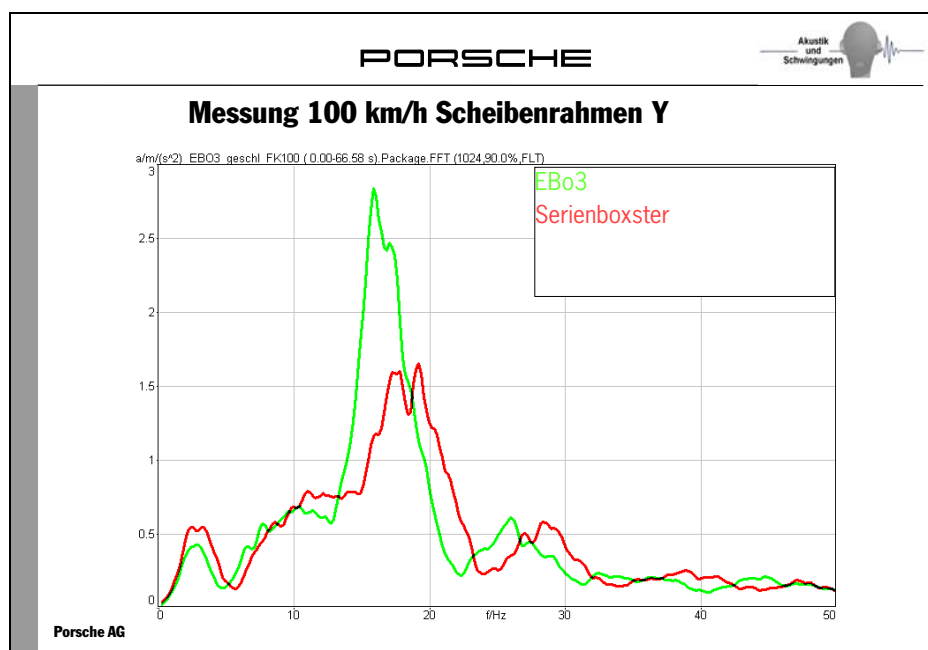


Abbildung 69: Vergleich der Fahrkomfortspektren am Boxster e und am Serienboxster

Offenbar gibt es eine Kopplung der Querschwingung des Antriebsaggregates mit der ersten globalen Karosserietorsionseigenfrequenz und der Radeigenfrequenz. Die Torsionseigenfrequenz sinkt aufgrund der Batteriemasse sowie der aus Packagegründen fehlenden hinteren Diagonalstreben im Vergleich zum Serienfahrzeug ab.

#### 3.2.4. HV-Batterie, HV-Laden

Die Lage der Traktionsbatterie an der Stelle des Verbrennungsmotors des herkömmlich mit Mittelmotor angetriebenen Serienfahrzeugs wirkt sich positiv auf den Schwerpunkt des Fahrzeugs und damit auch auf dessen Fahrdynamik aus.

Die in weiten Bereichen sehr flach verlaufende Spannungskurve der Zellen der Lithium Eisen Phosphat Batterie über dem Ladezustand erschweren die exakte Bestimmung des SOC. Eine genaue Bestimmung ist nur bei relativ leerer bzw. voller Batterie möglich, deshalb kann es zu ungenauer SOC- und damit auch Reichweitenanzeige kommen, wenn die Batterie nur selten leer gefahren bzw. voll geladen wird.

Um möglichen Schäden der einzelnen Zellen durch Über- bzw. Unterspannung oder zu hohe Temperaturen vorzubeugen müssen Spannung und Temperatur permanent überwacht werden. Über das Batteriemanagementsystem (BMS) werden die erfassten Daten ausgewertet und entsprechende Informationen an die Motorsteuerung und das Ladegerät gesendet um sicher zu stellen, dass im Lade- und Fahrbetrieb die Batterie kontrolliert innerhalb der zulässigen Grenzen geladen bzw. entladen wird.

Zur Kühlung der Batterie ist ein gesonderter Niedertemperatur Kühlkreislauf erforderlich, der dafür sorgt, dass eine Zelltemperatur von 45°C nicht überschritten wird. Bei sportlicher Fahrweise, vor allem beim Allradfahrzeug mit hoher Leistung, können bis zu 5kW Wärmeverluste in der Batterie entstehen. Um diese Wärme auch bei hohen Außentemperaturen abführen zu können wird ein Klimakompressor in den Kühlkreislauf integriert.

Die verwendete Zellchemie auf Basis von  $\text{LiFePO}_4$  erwies sich als sehr robust. Auch nach 25.000 gefahrenen Kilometern weist die Batterie mit den meist gefahrenen Kilometern kaum spürbare Verluste von Leistung und Energie und damit auch der Reichweite auf. Eine Aussage über die zu erwartende Lebensdauer kann nach dem kurzen Erprobungszeitraum noch nicht getroffen werden.

Hinsichtlich der Ladeleistung von 3,3 kW hat sich im Feld gezeigt, dass eine wesentlich höhere Ladeleistung gewünscht wird, um eine höhere Fahrzeugverfügbarkeit zu gewährleisten. Diesbezüglich werden die Fahrzeuge im Nachgang des Projekts mit Ladegeräten ausgerüstet, die eine höhere Ladeleistung und damit eine verkürzte Ladedauer ermöglichen.

Als positiv hat sich die Zuverlässigkeit/Robustheit der Ladegeräte erwiesen. Nach anfänglichen Schwierigkeiten in der Funktionsentwicklung konnte der Feldversuch mit einem stabilen Ladebetrieb gestartet werden.

### 3.2.5. Fahrwerk, elektrische Lenkung, Bremssystem

Gegenüber Verbrennungsmotoren erfordert die Kraftereinleitung der Reaktionsmomente von EM eine veränderte Dimensionierung der Querträger der Achsen. Um dem gerecht zu werden, wurde der Blechquerschnitt des Hinterachsquerträgers an der zentralen Kraftereinleitungsstelle um 400% erhöht.

Mit dem in den Erprobungsfahrzeugen eingesetzten Fahrdynamik Regelsystem ESP 9 hev konnten die erwarteten funktionalen Vorteile voll umfänglich dargestellt werden, so dass diese Technologie in den Auswahlprozess für zukünftige Anwendungen in E-Fahrzeugen mit Heckantrieb einfließen kann. Bei diesem System wird nur die Hinterachse geregelt, wodurch ausschließlich das Moment rekuperiert werden kann, welches an der Hinterachse abgesetzt wird. Deshalb ist dieses System für einen Allradantrieb nicht so gut geeignet. In einem Fahrzeug, welches über beide Achsen rekuperieren soll ist ein Bremssystem wie der iBooster hev besser geeignet, da dieses System über das Gesamtfahrzeug verblenden kann und das Potential der Rekuperation an beiden Achsen voll ausgenutzt werden kann.

ESP Pumpenanlauf und damit verbundenes Geräusch bei jeder Bremsbetätigung ist noch nicht kundenfähig. Teilweise kann der Schallübertrag in den Innenraum durch verbesserte ESP-Aggregatlagerungen reduziert werden, jedoch bleiben die Pumpenanläufe auf Grund der fehlenden Umgebungsgeräusche in einem E-Fahrzeug auffälliger als in einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

Bei Elektrofahrzeugen wie dem Boxster e kommt eine elektrische Unterdruckpumpe [ELUP] als Bremskraftverstärkung zum Einsatz. Aus Sicherheitsgründen wurde in den Erprobungsfahrzeugen als Hilfs- (Failsafe-) Maßnahme zunächst eine zweite ELUP verbaut. Auswertungen der Einschalthäufigkeiten haben ergeben, dass auf den Einsatz einer zusätzlichen Failsafe-Pumpe verzichtet werden könnte. Die gesetzeskonforme Bremsverzögerung ist bereits durch eine Pumpe sichergestellt. Eine Hochrechnung der Pumpenanläufe ergab eine ausreichende Dauerhaltbarkeit für 200.000km.

Die im Elektrofahrzeug eingesetzte elektromechanische Lenkung trägt zur Reduzierung der Fahrwiderstände bei. Das elektrische 12V-Bordnetz wird nur dann beansprucht, wenn eine Servounterstützung der Lenkung erforderlich ist. Im Vergleich zu einer hydraulischen Servolenkung beträgt die mittlere Aufnahmeleistung der elektromechanischen Lenkung bei einer durchschnittlichen Stadt-/ Landstraßen-/ Autobahnfahrt in der Region Stuttgart nur 1,4% der aufgenommenen Leistung der hydraulischen Lenkung.

Umgesetzte Maßnahmen, um die Fahrwiderstände möglichst gering zu halten:

- Minimierung der Restbremsmomente zwischen Bremsbelägen und -scheiben.
- Erhöhung des Reifenluftdruckes um 0,2 bar für das beladene Fahrzeug.
- Reduzierung der rotatorischen Trägheiten durch Leichtbau-Räder und Bremscheiben.

### 3.2.6. Elektroantrieb, Antriebsmanagement

#### Untersuchung verschiedener Antriebsstrangkombinationen

Bei der Untersuchung der Antriebsstrangeffizienz zeigte sich, dass bei der Verwendung von vier Antriebseinheiten ein höherer Energiebedarf im Vergleich zu einer oder zwei Antriebseinheiten entsteht.

Die **2WD Fahrzeuge** mit einer EM erhalten eine kurze Übersetzung mit  $i=9,81$ . Durch diese kurze Übersetzung wird eine Maximalgeschwindigkeit von 150 km/h ermöglicht. Durch die kurze Übersetzung ergibt sich mit dem maximalen Motormoment von 270 Nm ein Radmoment von 2650 Nm an der angetriebenen Achse. Dadurch wird ein gutes, für den urbanen Betrieb angepasstes Anfahrverhalten erreicht.

Beim **Allradfahrzeug** kann das Radmoment zugunsten der Höchstgeschwindigkeit reduziert und gleichzeitig noch das Beschleunigungsvermögen verbessert werden. Durch eine Übersetzung von  $i=6,9$  ergibt sich eine Höchstgeschwindigkeit von 200km/h. Das maximale Radmoment beträgt pro Achse 1860 Nm, gesamt also. 3720 Nm. Damit besitzt das Fahrzeug ein höheres Zugkraftangebot und eine größere Maximalgeschwindigkeit. Ergänzt durch das neuartige Allradkonzept ergibt sich hier ein Fahrzeug mit einem sportlichen Charakter.

### 3.2.7. Klimatisierung, Sicherheitskonzept

#### Heizsystem

Um die Anforderungen in Bezug auf die Heizleistung erfüllen zu können musste ein elektrischer HV-Zuheizer in den Fluid-Kreislauf integriert werden. Auch Komponenten wie z.B. die elektrischen Wasserpumpen wurden entsprechend den Gegebenheiten (Leitungslängen/-querschnitte, Druckabfälle Aggregate) neu definiert und das Regelkonzept zur Ansteuerung der Komponenten zur Innenraumheizung unter Beachtung der Wechselwirkung mit der Aggregatekühlung angepasst.

Die Ansprechzeit des HV-Zuheizers ist gegenüber der eines Verbrennungsmotors im Vorteil. Somit kann eine schnelle Innenraumaufheizung gewährleistet werden. Die installierte Heizleistung von 5 kW kann nicht unter allen Bedingungen den gleichen



Komfort bieten wie in einem konventionellen Fahrzeug. Die Leistungsgrenze lag etwa bei Temperaturen um ca.  $-10^{\circ}\text{C}$ .

### Kältekreislauf Klimaanlage

Durch die Anordnung des elektrischen Kältemittelverdichters im Vorderwagen konnten Leitungsverluste signifikant reduziert werden. Bei der Befestigung des Klimakompressors waren Maßnahmen zur Körperschallentkopplung von der Karosserie notwendig. In Bezug auf die Kälteleistung waren keine Leistungsnachteile aufgetreten. Änderungen im Systemverhalten bzgl. Stabilität wurden nicht festgestellt.

### HV-Batteriekühlung

Die umfangreichen zusätzlichen Funktionalitäten für die Kühlung der HV-Batterie konnten mit dem bestehenden Klima-Steuergerät nicht abgedeckt werden. Deshalb war es erforderlich ein zusätzliches Rapid-Prototyping-Steuergerät (RPT) mit Gateway-Funktionen in die EE-Architektur zu integrieren und die entsprechende Software zu beschreiben bzw. zu spezifizieren.

Damit konnte die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems erweitert werden, sodass die HV-Batterie und der Innenraum bedarfsgerecht gekühlt werden konnten. Der im Boxster e konzipierte Fluidkreislauf und dessen Regelung (Softwareapplikation) zur HV-Batteriekühlung bilden die Grundlage für alle weiteren Porsche-Projekte im Bereich E-Mobilität. Das variable Kühlsystem mit vielen Freiheitsgraden in Bezug auf die Regelung trägt zur Effizienzerhöhung und somit zur Reichweitenoptimierung bei.

Weitere Effizienzerhöhung durch Isolation von Kühlmittleitungen im Schweller Bereich sind möglich und nötig, aber nicht zur Gewährleistung der Funktion erforderlich.

### 3.2.8. 12V System mit DC/DC-Wandler, Bordnetz

Traktionsbatterie und Elektromotoren arbeiten unter Hochspannung von bis zu 400 Volt und häufig mit sehr hohen Strömen von bis zu 450A. Für diese Anforderungen musste eine neue Elektrik-Architektur erarbeitet werden. Auch das 12V Bordnetz musste an die geänderten Anforderungen angepasst werden.

Die wesentlichen Herausforderungen dabei waren:

- Die Versorgung des 12V Bordnetz durch die Integration eines DC/DC-Spannungswandlers.
- Sichere Integration der Hochvoltleitungen in die vorhandenen Bauräume so, dass eine Beschädigung dieser ausgeschlossen und die Störeinflüsse auf das bestehenden Bordnetz so gering wie möglich sind.

- Erstellung von Schaltplänen und Absicherungskonzepten mit allen neuen Komponenten.
- Ausarbeitung einer CAN- Vernetzung für alle neuen Busse wie Hybrid- und Antriebs-CAN.

### 3.2.9. Anzeigen

Für Elektrofahrzeuge, die über eine nur geringe Reichweite verfügen, ist es umso wichtiger, dem Fahrer genaue Informationen über die restliche Reichweite zu geben. Diesbezüglich wurde ein neuer und innovativer Algorithmus zur Reichweitenberechnung erforscht, welcher sich grundlegend von bisher bekannten Algorithmen unterscheidet. Die Reichweite wird unter Berücksichtigung aller relevanten Verbraucher (Antrieb, Klimakompressor, PTC-Heizung, Bordnetz) ermittelt. Eine prädiktive Abschätzung des Klimatisierungsbedarfs in Abhängigkeit der aktuellen Außentemperatur erlaubt eine weitere Präzisierung der Restreichweitenermittlung bereits direkt ab Fahrtbeginn. Direkte Rückwirkungen von reichweitenbeeinflussenden Fahrerhandlungen wie z.B. „AC off“ oder „Verdeck zu“ auf die Reichweite werden in der Berechnung berücksichtigt. Parallel zur aktuellen Reichweite wird dem Fahrer eine von seiner Fahrweise unabhängige Referenzreichweite angezeigt, die auf einem festen, fiktiven Stadtfahrzyklus basiert.

### 3.2.10. Erprobungsergebnisse

Die Erprobungsteilnehmer attestieren dem Fahrzeug im Bereich des **Antriebs** durchschnittlich eine „gute“ Note und das Fahren mit dem Boxster e wurde oftmals als neuartiges Fahrerlebnis empfunden. Insbesondere im Stadtbetrieb konnte das Antriebskonzept durchweg überzeugen. Die Kritikpunkte beziehen sich zum Großteil auf die zu niedrige Leistung und das Durchzugsvermögen im Überlandverkehr bei den 2-WD Fahrzeugen.

In der Kategorie **Fahrwerk** haben die Fahrzeuge ebenfalls eine „gute“ Note erzielt. Allerdings gab es einige Hinweise, dass die Abstimmung von Rekuperation und Bremsanlage weiter optimiert werden muss.

Im Bereich **Elektrik** wurde von den Erprobungsteilnehmern das Anzeigekonzept und die Bedienlogik des Boxster e gelobt. Vor allem der Reichweitenmanager zum Reichweitengewinn wurde positiv hervorgehoben. Die Handhabung des Ladekabels erwies sich häufig als unangenehm und lästig. Eine Lösung des Problems für die Zukunft könnte das kontaktlose Laden per Induktion sein.

In der Kategorie **Karosserie/Klimaanlage** zeigte sich eine insgesamt niedrigere Heizleistung des Boxster e im Vergleich zum Serienfahrzeug. Der hohe Einfluss der Klimaanlage auf die Gesamtreichweite wurde beanstandet.

Bezüglich des **akustischen Eindrucks** wurde vor allem das Erlebnis „lautloses Fahren“ als äußerst angenehm hervorgehoben. Als Folge des fehlenden Motorengeräusches drängen sich jedoch andere Nebengeräusche als störend in den Vordergrund. Die Möglichkeit der Aktivierung des Active-Sound-Design Systems (ASD) zur Störgeräuschüberlagerung wurde dennoch zumeist nicht vorgenommen. Das Sound-System wirkte auf die Erprobungsteilnehmer zumeist synthetisch, nicht authentisch und störend. Die Funktion der Fußgängerwarnung wurde jedoch als notwendig erachtet, sodass eine Aktivierung des ASD im Stadtverkehr zur Wahrung der Verkehrssicherheit befürwortet und oftmals vorgenommen wurde.

### Erkenntnisse für weitere Projekte

Im Rahmen der Felderprobung haben sich folgende Themen herauskristallisiert, die in Folgeprojekten weiter bearbeitet werden sollten:

#### Akustik:

- Weitere Sound Optimierung erforderlich (UNO-Richtlinie ab Sommer 2011)
- Akustisches Signal für den Startvorgang auch bei abgeschaltetem Sound realisieren

#### Antrieb:

- Rückwärts Anfahren am Berg mit 4WD zu optimieren, negatives Moment an der Vorderachse ermöglichen.
- Anfahren in steilem Gelände zu optimieren, Hänger Betrieb nicht möglich
- Leistungselektronik passt nicht zur Spannungslage der Batterie. Neue Leistungselektronik erforderlich
- Zulässige Stromgrenzen werden gelegentlich überschritten, dadurch Ausfall der Fahrbereitschaft, Anpassungen erforderlich
- Rekuperation bei voller Batterie nicht möglich: Rekuperationsmoment könnte durch Bremse simuliert werden
- Wählhebel kann während der Fahrt in Rückwärtsgang geschaltet werden, dadurch Fehlermeldung mit Wegnahme der Fahrbereitschaft, Sperre realisieren
- Rekuperationsstufen wirken sich auch bei getretenem Fahrpedal auf das Motormoment aus, Änderung erforderlich
- Beölung, Getriebe an der VA, Geräusche
- Bei >120 km/h Drehmomentschwingungen, weitere Optimierung der Phasenabstimmung erforderlich

#### Anzeigen:

- Reichweitenmanager Verknüpfung mit Navi, Anzeige der Ladestationen
- Car-PC, Anzeige dauert zu lange bis Bild erscheint
- Anzeige Stadtreichweite überflüssig

- Automatische Ladeerkennung und Umschaltung des Display zwischen Laden und Fahren noch nicht umgesetzt

#### Batterie:

- Bei komplett entleerter Batterie lässt sich der Ladevorgang nicht stabil starten, Optimierung erforderlich
- Ladevorgänge noch nicht stabil, weitere Optimierung erforderlich
- SOC-Bestimmung funktioniert noch nicht zuverlässig

#### Elektrik:

- Zu hoher Ruhestrom bei abgestelltem Fahrzeug kann zur Entleerung des Bordnetzes führen
- Unterbringung des Ladekabels im Fahrzeug optimieren
- Bidirektionale on board unit zum Laden
- Abrechnung über Ladestationen
- Schnellladegerät mit 22 kW

#### Fahrwerk:

- Ersatz des Wählhebels für mehr Platz in der Mittelkonsole
- Parksperre fehlt

#### Klimatisierung, Kühlung:

- Geräuschübertragung von Wasserpumpen und Klimakompressor vermindern
- Vorkonditionierung on grid noch nicht umgesetzt

### 3.2.11. Energiemanagement

#### Verbrauchsmessungen im NEFZ-Zyklus:

Der durchschnittliche Verbrauch für Traktion liegt bei 152 Wh/km. Im Mittel konnten 28 Wh/km rekuperativ zurückgewonnen werden. Hieraus resultiert ein effektiver Verbrauch für Traktion von 124 Wh/km.

Zum Energieverbrauch für Traktion kommen weitere Anteile zur Versorgung des Bordnetzes (DC/DC-Wandler) und Klimakompressor (AC) hinzu. Diese betragen im Mittel 12,1 Wh/km für Bordnetz und 13,4 Wh/km zur Versorgung des Klimakompressors. Somit beträgt der Gesamtenergieverbrauch 150 Wh/km.

Unter weiterer Berücksichtigung der Verluste beim Laden der Batterie ergibt sich ein typisierungsrelevanter Gesamtverbrauch nach ECE-101 Richtlinie nach Steckdose von 188Wh/km.

## Energieverbrauch im kundennahen Straßenbetrieb

Im normalen Straßen Betrieb variiert der durchschnittliche Energieverbrauch für Traktion in Abhängigkeit vom Fahrstil zwischen 126 Wh/km bei vorausschauender Fahrweise, 146 Wh/km bei normaler Fahrweise bis hin zu 181 Wh/km bei sportlicher Fahrweise. Im Durchschnitt ergab sich bei Testfahrten unter Berücksichtigung der Verluste beim Laden ein Gesamtenergieverbrauch von 217Wh/km, das sind 15% mehr als im NEFZ. Bei einer Außentemperatur von 30°C beträgt der Anteil der Nebenaggregate am Gesamtverbrauch bis zu 40%.

Bei vorausschauender Fahrweise wird 80%, bei normaler Fahrweise immerhin noch 60% der Energie bei einem Antriebsmoment kleiner 60Nm abgegeben. Diese Erkenntnisse können bei künftigen Maschinenauslegungen berücksichtigt werden.

### **3.3. Fortschreibung des Verwertungsplans**

#### Patentanmeldungen

<b>Pos.</b>	<b>Interne ID</b>	<b>Gegenstand</b>	<b>Amtliches Aktenzeichen</b>	<b>Anmeldetag</b>
1	BW15/DE	Antriebsanordnung für ein Elektrofahrzeug	DE 10 2010 007 642.2	05.02.2010
2	BW18/DE	Fahrzeug mit elektrischer Antriebsvorrichtung	DE 10 2010 007 633.3	05.02.2010
3	BW82/DE	Energiespeicher für ein Kraftfahrzeug	DE 10 2010 013 012.5	26.03.2010
4	BX44/DE	Beutelzellenbatterieanordnung und entsprechendes Herstellungsverfahren und Verwendung	DE 10 2010 021 148.6	21.05.2010
5	CA28/DE	Kraftfahrzeug	DE 10 2011 000 175.1	17.01.2011
6	CA37/DE	Batterie	DE 10 2011 000 353.3	27.01.2011
7	CA47/DE	Galvanische Zelle sowie entsprechendes Verfahren zu ihrer Herstellung	DE 10 2011 000 449.1	02.02.2011
8	CA48/DE	Kraftfahrzeug	DE 10 2011 000 482.3	03.02.2011
9	CA49/DE	Batterie	DE 10 2011 000 574.9	09.02.2011
10	CA50/DE	Hybrid- oder Elektrofahrzeug	DE 10 2011 000 573.0	09.02.2011

Pos.	Interne ID	Gegenstand	Amtliches Aktenzeichen	Anmeldetag
11	CA53/DE	Getriebe	DE 10 2011 000 571.4	09.02.2011
12	CA55/DE	Batterie	DE 10 2011 000 572.2	09.02.2011
13	CA60/DE	Batterie	DE 10 2011 000 575.7	09.02.2011
14	CA68/DE	Wechselgestell und Verfahren zur Montage und/oder Demontage eines elektrischer Energiespeichers eines Kraftfahrzeugs	DE 10 2011 000 692.3	14.02.2011
15	CA69/DE	Elektrischer Energiespeicher eines Kraftfahrzeugs	DE 10 2011 000 693.1	14.02.2011
16	CA70/DE	Elektrischer Energiespeicher eines Kraftfahrzeugs	DE 10 2011 000 695.8	14.02.2011
17	CA71/DE	Elektrischer Energiespeicher eines Kraftfahrzeugs	DE 10 2011 000 696.6	14.02.2011
18	CB27/DE	Elektrische Steckverbindung	DE 10 2011 001 810.7	05.04.2011

**Tabelle 7: Patentanmeldungen**

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Aufgrund der Endlichkeit der Erdölvorräte wird eine Umstellung des Antriebs zwingend erforderlich werden. Als alternative Energiespeicher bieten sich Batterien oder auch die Brennstoffzelle an. In beiden Fällen sind Elektroantriebe Teil des neuen Antriebskonzeptes. Ab Ende des Jahrzehnts ist mit einer kontinuierlichen Zunahme elektrischer Antriebe zu rechnen. Das hier vorliegende Projekt hat hierfür wesentliche Grundlagenerkenntnisse bezüglich Technik erarbeitet. Gleichzeitig wurde aufgezeigt, dass E-Antriebe eine marktfähige Ergänzung zum Verbrennungsmotor sein können. Die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und die positive Resonanz der Beurteiler belegen die gute Basis. Andererseits wurde auch klar erkennbar, dass noch große Entwicklungsschritte erforderlich sein werden, bis man dem Kunden ein vergleichbares Performance-, Qualitäts- und Komfortniveau wie beim heutigen Automobil anbieten kann. Gerade der Ladeprozess weist noch deutliches Potential auf. Es bleibt aber unstrittig, dass für den dauerhaften wirtschaftlichen Erfolg Elektroantriebe erforderlich sein werden. Einzelne Projektergebnisse, z. B. aus dem Energiemanagement oder dem Bereich Heizung/Klima werden darüber hinaus auch kurzfristig in die Produkte einfließen und zur Reduktion des Energieverbrauches beitragen.

- **wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten**  
Alle technischen Ansätze haben ihre grundsätzliche Machbarkeit unter Beweis gestellt. Sinnvolle Modifikationen, auch im Sinne einer verbesserten Kundenfähigkeit, wurden erarbeitet. Ein langfristiger Entwicklungserfolg ist wahrscheinlich.
- **wissenschaftliche und technische Anschlussfähigkeit**  
Elektroantriebe sind in vielen technischen Anwendungen bekannt, allerdings wurden sie bisher nur in Kleinserien in Automobilen eingesetzt. Die besonders hohen Anforderungen bezüglich Einsatzbedingungen in Verbindung mit extremer Zuverlässigkeit und einem hohen Kostendruck machen weitere Forschungsarbeit erforderlich. Diese Situation und die positiven Ergebnisse des Projektes führen zu der Empfehlung, die erarbeiteten Innovationen in künftigen Projekten weiter in Richtung Markteinführung zu entwickeln.

Darüber hinaus gibt es im Projekt keine Arbeitspunkte, die nicht bearbeitet oder die nicht zu einer Lösung geführt hätten. In konstruktiven Details stellten sich andere Lösungen als im Anfangskonzept angedacht als sinnvoller heraus. Dies führte aber nirgends zu einem wesentlichen Entfall von im Antrag angesprochenen Funktionen und Ergebnissen.

### 3.4. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Das Projekt wurde im vereinbarten Kosten- und Zeitrahmen abgewickelt.

Datum	Vorgang	Gesamtkosten (EUR)	Förderbetrag (EUR)
28.04.2010	Antragstellung bei PTJ	6.005.900.-	3.002.950.-
14.07.2010	LOI erhalten	-	-
26.10.2010	Zuwendungsbescheid	6.005.900.-	2.882.832.-
12.05.2011	Verlängerung kostenneutral beantragt bis 31.10.2011	6.005.900.-	2.882.832.-
25.07.2011	Bestätigung Verlängerung bis 30.09.2011	6.005.900.-	2.882.832.-
06.09.2011	Antrag auf Aufstockung	um 1.753.000.- gesamt neu 7.758.900.-	um 876.500.-
04.11.2011	Zuwendungsbescheid Aufstockung	7.758.900.-	um 841.440.- Förderbetrag neu 3.724.272.- EUR
30.11.2011	Abschluss Förderprojekt	-	-

Tabelle 8: Kosten- und Zeitplanung