

**FuE-Programm "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)**

**Abschlussbericht**

Vorhabenbezeichnung:

Innovatives Antriebskonzept für einen Plug-In-Hybrid mit hohen Leistungsanforderungen im oberen Fahrzeugsegment – Plug-In-Hybrid

Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.01.2014

bis: 31.12.2016

Zuwendungsempfänger:  
*(Auflistung aller Verbundpartner)*

Volkswagen AG  
Berliner Ring 2  
Brieffach 1172  
38440 Wolfsburg

Förderkennzeichen:  
*(FKZ's entsprechend der links angegebenen Verbundpartner)*

16EM2035-1

## **1. Executive Summary**

Plug-In Hybridfahrzeuge vereinen die Stärken der klassischen verbrennungsmotorischen Antriebe mit den Vorteilen der alternativen elektrischen Antriebe, indem sie einen per Stecker wieder aufladbaren rein elektrischen Kurzstreckenbetrieb für den täglichen Gebrauch gewährleisten und gleichzeitig einen Langstreckenbetrieb durch den Verbrennungsmotor sicherstellen. Es existieren unterschiedliche Konzeptansätze zur technischen Darstellung von Plug-In Hybriden, die sich im Wesentlichen in zwei Kategorien unterteilen lassen. Zum einen sind das Parallelhybride, bei denen ein klassischer verbrennungsmotorischer Antrieb „parallel“ mit einem elektrischen Sekundärtrieb kombiniert wird. Diese Parallelhybride erfordern eine elektrische Maschine samt Umrichter und Energiequelle bzw. Batterie und beide Teilantriebe können einzeln oder gemeinsam betrieben werden. Als Zweites existieren Konzepte auf Basis von zwei elektrischen Maschinen, bei denen das Zusammenspiel zwischen Verbrennungsmotor und den elektrischen Maschinen eine große Rolle spielt. Beide Konzeptansätze weisen ihre Vor- und Nachteile auf (siehe Abschnitt 2) und sind auf dem Markt vertreten. Ziel des hiesigen Projekts ist es, ein neuartiges Antriebskonzept zu entwickeln und als Prototyp darzustellen, welches die Vorteile beider Konzeptansätze kombiniert und dadurch hoher Komfort bei gleichzeitig hoher Performance und hoher Effizienz gewährleistet. Des Weiteren sollen der Bauraumbedarf, das Gewicht und die Kosten des Antriebs im Vergleich zu heutigen PHEV-Lösungen reduziert werden, was wiederum zur Vergrößerung der Batterie genutzt werden kann, so dass dem Kunden ein höherer elektrischer Aktionsradius angeboten werden kann als in heutigen PHEV-Serienlösungen und die Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebe steigern kann.

## **2. Zielstellung des Projektes**

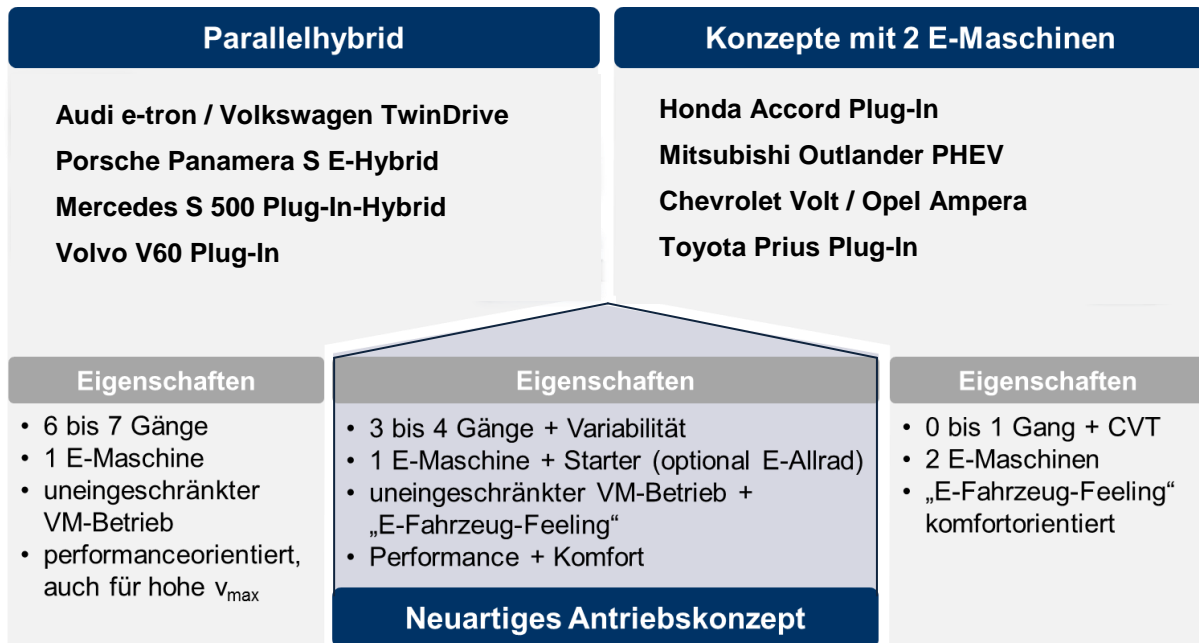
Gesamtziel des Projektes war die Untersuchung des Potentials von Plug-In Hybrid-Technologien für Fahrzeuge mit hohen Leistungsanforderungen im oberen Fahrzeugsegment. Vor dem Hintergrund der hohen Leistungsanforderungen in Kombination mit dem geringen verfügbaren Bauraum dieser Fahrzeugklasse galt es die technischen Grenzen zu erforschen und ein tragfähiges Konzept für einen Plug-In Hybrid Antriebsstrang zu erarbeiten.

Im Folgenden sollen die anvisierten Alleinstellungsmerkmale und Ansätze mit hohem Innovationsgrad im Projektvorhaben dargestellt werden.

Die aktuellen Antriebskonzepte für Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV) teilen sich auf zwei Typen auf: Auf der einen Seite stehen die Parallelhybridfahrzeuge. Diese verwenden ein in ähnlicher Form aus nicht elektrifizierten Antrieben bekanntes Automatikgetriebe mit typischerweise sechs bis sieben Gängen. Dieses wird mit einer leistungsstarken E-Maschine und einer Hochleistungs-/Hochenergiebatterie kombiniert. Mit dieser Kombination sind uneingeschränkte Fahrleistungen, auch im verbrennungsmotorischen Betrieb, möglich und auch bei der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit gibt es keine Einschränkungen. Allerdings ist der Getriebeaufwand sehr hoch. Dies ist insbesondere bei PHEVs kritisch, da die mit den elektrischen Komponenten verbundenen Mehrkosten einer starken Marktdurchdringung zurzeit noch im Wege stehen.

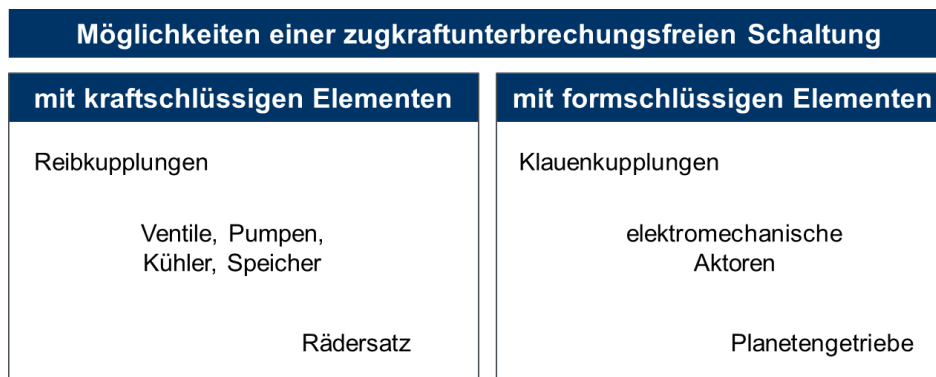
Auf der anderen Seite stehen die Konzepte mit zwei Elektromaschinen, die entweder als Mischhybrid in Form einer Kombination eines seriellen Betriebsmodus mit einem festen Gang oder als leistungsverzweigter Hybrid dargestellt sind. Hiermit lässt sich ein stufenloser Fahrbetrieb (E-CVT = electrically continuously variable transmission) ohne spürbare Schaltungen realisieren, was von vielen Kunden als sehr komfortabel empfunden wird („E-Fahrzeug- Feeling“). Allerdings sind auch diese Antriebskonzepte mit hohen Kosten verbunden, da zwei leistungs- und drehmomentstarke Elektromaschinen mit entsprechenden Leistungselektroniken erforderlich sind. Des Weiteren weisen diese Antriebe insbesondere für Fahrzeuge mit hohen Fahrleistungsanforderungen den Nachteil auf, dass aufgrund der begrenzten Gangzahl bzw. der erforderlichen Drehmomentabstützung durch eine Elektromaschine der Verbrennungsmotor in der Leistungsabgabe auf die angetriebene Achse bzw. die angetriebenen Achsen (Allrad) begrenzt ist.

An dieser Stelle setzt die Konzeptidee des hier betrachteten Projektvorhabens an, dass die Vorteile beider Welten zu vereinen anstrebt, vgl. folgende Abbildung 1.



**Abbildung 1: Konzeptübersicht PHEVs**

Aufgrund der installierten elektrischen Leistung kann die Gangzahl gegenüber dem Parallelhybriden auf 3 bis 4 feste Gänge reduziert werden, da die Elektromaschine die sich durch die vergrößerten Stufen-sprünge ergebenden Zugkraftlücken auffüllen kann. Des Weiteren werden kraftschlüssige Lamellenkuppelungen durch formschlüssige Schaltelemente ersetzt, die ohne eine aufwändige Hydraulik auskommen und große Vorteile bezüglich Bauraum, Kosten, Gewicht und Effizienz bringen. Um trotzdem komfortable Gangwechsel zu ermöglichen und gleichzeitig das „E-Fahrzeug-Feeling“ ohne spürbare Schaltungen darzustellen, wird ein Planetengetriebe verwendet, welches im Zusammenspiel mit einer Elektromaschine die E-CVT-Funktion bieten kann. Die folgende Abbildung 2 vermittelt, dass damit zugkraftunterbrechungsfreie Schaltungen mit wesentlich einfacheren Getriebeelementen möglich sind.



**Abbildung 2: Möglichkeiten zugkraftunterbrechungsfreier Schaltungen in Plug-In Hybriden**

Hierfür ist im Gegensatz zu den leistungsverzweigten Hybridantrieben keine zweite Elektromaschine erforderlich. Nur für Fahrzeuge mit besonders hohen Leistungsanforderungen an das elektrische Fahren

kann optional eine elektrische Antriebseinheit an der zweiten Fahrzeugachse vorgesehen werden. Diese war Teil des Projektumfangs, um sämtliche Funktionen darstellen und erproben zu können.

Die Projektziele auf Antriebskonzeptseite lassen sich damit in folgenden Stichpunkten zusammenfassen:

- Reduzierung Bauraum, Gewicht, Kosten
- Verbesserung Komfort gegenüber Parallelhybrid: „E-Fahrzeug-Feeling“, d.h. keine spürbaren Gangwechsel
- Bessere VKM-Ausnutzung gegenüber 2-EM-Konzepten durch feste Gänge
- Hohe Effizienz und Performance

Um diese Ziele umzusetzen und andererseits eine Lösung für die extrem begrenzten Bauraumverhältnisse in den hier betrachteten Fahrzeugen in den höheren Segmenten zu finden, waren auf Getriebeseite folgende Maßnahmen in einer vollkommen neuartigen Getriebestruktur umzusetzen:

- Reduzierter Getriebeaufwand gegenüber Parallelhybrid:
  - Formschlüssige Schaltelemente
  - Entfall Hydraulik, Ersatz durch einfache elektromechanische Aktoren
  - Erhöhte Getriebefunktionalität bei reduzierter Gangzahl
- Variable Betriebsmodi zur Übersetzungsverstellung mit nur einer E-Maschine
- Auslegung für zugkraftneutrales Schalten (inkl. Rückschaltungen)

Zusätzlich wurde eine Getriebeeinheit für die rein elektrisch angetriebene Achse vorgesehen, wobei neuartige Ansätze bewertet und die optimale Lösung umgesetzt wurde, siehe auch Arbeitspaketbeschreibung 4 in Abschnitt 3.

Ebenfalls innovative Lösungen waren in den weiteren in Abschnitt 3 behandelten Arbeitspaketen erforderlich und vorgesehen:

- Eine Elektromaschine höchster Leistungsdichte war in die Antriebseinheit aus Verbrennungsmotor und Getriebe zu integrieren, wobei hohe Anforderungen an die Kompaktheit und eine packagekonforme Umsetzung zu erfüllen waren, siehe Beschreibung des Arbeitspakets 2 in Abschnitt 3.

Eine zweite Elektromaschine war für die rein elektrisch angetriebene Achse erforderlich.

- Insbesondere für elektrische Antriebe mit sehr hohen Leistungsanforderungen war zu prüfen, ob ein Sprung in höhere Spannungsklassen sinnvoll ist, um unter anderem die auftretenden Ströme zu begrenzen. Diese Betrachtung ist Teil des Projektumfangs, vgl. Arbeitspaket 3.

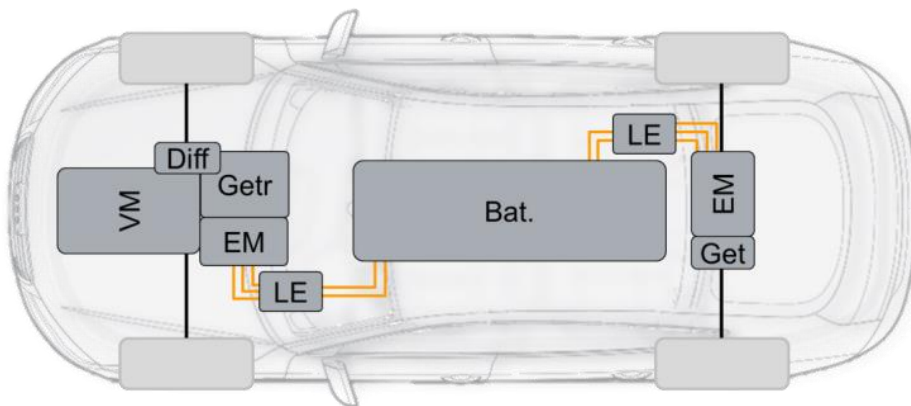
- An die Traktionsbatterie wurden im Rahmen dieses Projektes extrem hohe Anforderungen sowohl an die Energie- als auch an die Leistungsdichte gestellt. Hierzu wurden neue Batteriezellen, die die Eigenschaften von High Power- und High Energy-Zellen kombinieren, und deren Integration in ein Gehäuse mit bestmöglicher volumetrischer Ausnutzung und Sicherstellung der notwendigen Batteriekühlung betrachtet, siehe Arbeitspaket 5.
- Bei Fahrzeugen hoher Leistungen stellen das Kühlkonzept und das Thermomanagement besondere Herausforderungen dar. Hierzu wurden in diesem Projekt neue Ansätze erarbeitet, die den hohen Anforderungen des Antriebsstrangs gerecht werden, vgl. Arbeitspaket 6.
- Für das perfekte Zusammenspiel der neuartigen, innovativen Komponenten in dem vorgesehenen Antriebsstrang war eine Antriebssteuerung und Betriebsstrategie zu erarbeiten, die Effizienz, Performance und Komfort bestmöglich vereint. Hierzu wurden grundlegend neuartige Funktionen in einem Rapid Prototyping Steuergerät umgesetzt und appliziert. Weiterhin waren Sicherheitsfunktionen für den gefahrlosen Betrieb und Darstellungen im Kombiinstrument und Radio-Navigationsgerät zu erarbeiten, siehe Arbeitspaket 7.
- Die Integration des neuartigen Antriebsstrangs für zukünftige Fahrzeugplattformen im oberen Segment in bestehende Fahrzeugarchitekturen für Demonstrationszwecke stellte eine weitere Herausforderung dar. Hierzu mussten Packagelösungen erarbeitet und Anpassungen an der Fahrzeugstruktur vorgenommen werden. Forschungscharakter hatte insbesondere die Findung von optimalen Integrationslösungen für die zukünftigen Zielfahrzeuge. Schließlich waren Inbetriebnahme und Erprobungsumfänge erforderlich, um den Konzeptnachweis in Demonstratorfahrzeugen erbringen zu können, vgl. Arbeitspaket 8.

Die im Vorigen beschriebenen innovativen Arbeitspakete mit Forschungscharakter erforderten eine enge Verzahnung, da nur ein systemischer Ansatz zum Erfolg führen konnte. Dies bedeutete eine intensive Abstimmung der Arbeitspaketverantwortlichen und teilweise ein iteratives Vorgehen, da beispielsweise Erkenntnisse aus den Arbeiten an einzelnen Komponenten Rückwirkungen auf das Antriebskonzept und andere Komponenten mit sich brachten. Die damit erforderliche Vernetzung der Arbeitspakete untereinander wird ebenfalls aus den Arbeitspaketbeschreibungen in Abschnitt 3 deutlich.

### 3. Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse des Projektes

#### Arbeitspaket 1: Konzeptionierung

Es wurden u.a. unterschiedliche Konzeptvarianten betrachtet, in denen beispielsweise die Fragestellung zur koaxialen, achsparallelen oder exzentrischen Anordnung von Verbrennungsmotor, E-Maschine und Getriebe der Vorderachsantriebseinheit bewertet wurden. Die koaxiale Anbindung der E-Maschine an das Getriebe hat im Gesamtsystem einen Bauraumvorteil aufgezeigt, weshalb die zunächst verfolgte achsparallele Anordnung verworfen und die koaxiale Umsetzung weiterverfolgt und umgesetzt wurde. Ergänzend wurde eine elektrische Antriebseinheit mit E-Maschine an der Hinterachse entschieden.



**Abbildung 3: Überblick Hauptantriebskomponenten (schematisch)**

Nach Festlegung des Konzepts wurden auf Grundlage von Anforderungen an das Fahrzeug (z.B. max. elektrische sowie hybridische Geschwindigkeiten, Beschleunigungszeiten und elektrische Reichweite) notwendige Eigenschaften und Lastkollektive für die einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs bestimmt. Hierzu wurden längsdynamische Simulationen entwickelt, welche Berechnungen von Fahrleistungen und Verbräuchen ermöglichen. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht zu simulierten Fahrleistungen des Konzeptfahrzeugs.

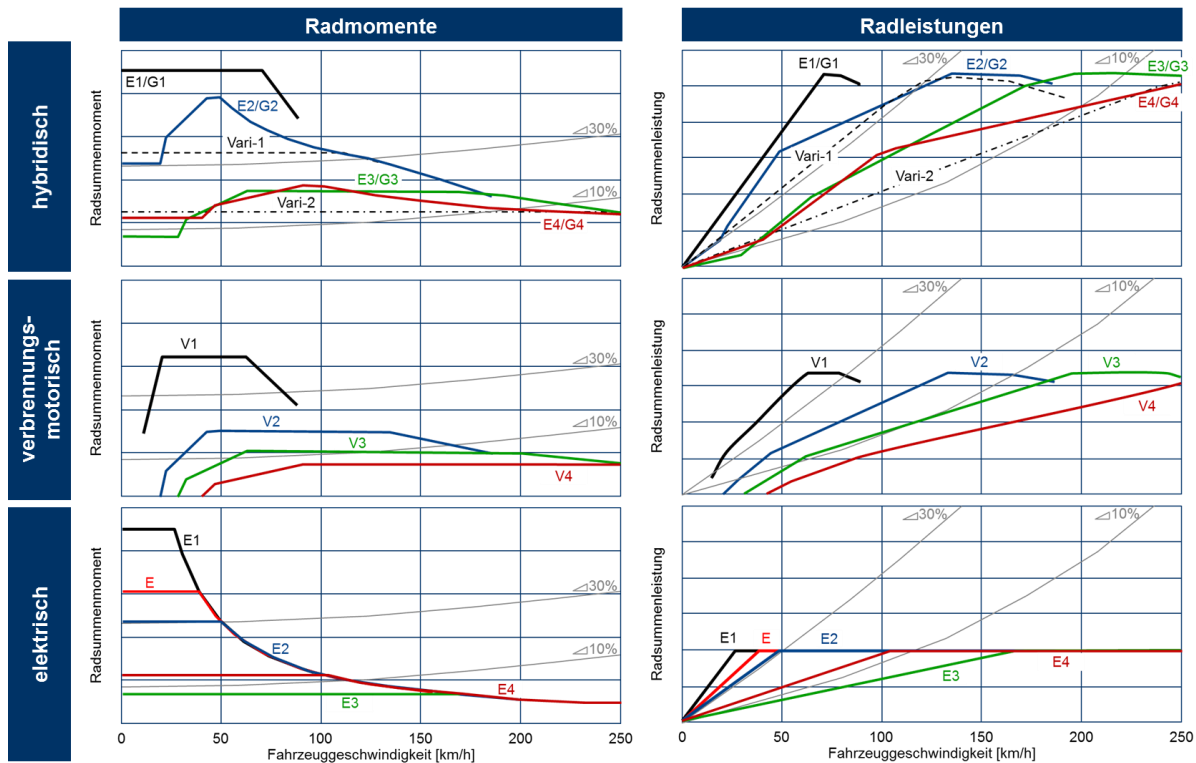


Abbildung 4: Übersicht zu simulierten Fahrleistungen des Konzepts

Das neuartige Getriebekonzept mit formschlüssigen Schaltelementen erfordert im Zusammenspiel mit Verbrennungsmotor und E-Maschine besonderes Augenmerk auf die Betrachtung der Übergangs- und Schaltvorgänge zwischen den verschiedenen Betriebszuständen und Gängen im Antriebsstrang, welche mithilfe von spezifisch entwickelten Simulationen abgebildet und untersucht wurden.

Hierbei wurden auch die Eigenschaften des Getriebe- und Antriebskonzeptes hinsichtlich potenziell kritischer Fahrsituationen betrachtet (siehe Abbildung 5).

Tip-In	Starke Verzögerung	Niedrige Geschwindigkeit
1. E-Fahren 80km/h → Beschleunigen zum Überholen des LKWs	4. Anhalten aus $v_{max}$ → schnelle Rückschaltung im Hintergrund, ggf. Rückschaltungen überspringen	5. Kriechen Anhänger bei leerer Batterie
2. E-Fahren 50km/h → Beschleunigen nach Ortsausgangsschild		6. rolling stop (Bremse am Stoppschild → dann wieder Gas geben; z.B. gleichrangige Straßen)
3. E-Fahren oder VM-Fahren 130km/h (Autobahn) → Beschleunigen zum Überholen, bzw. aus Zone der Geschwindigkeitsbegrenzung heraus		7. Schaukeln R-Gang/1. Gang
		8. 50 Nm kriechen

Abbildung 5: Betrachtung Schaltungen, kritische Fahrsituationen





## Arbeitspaket 2: Elektromaschinen/Leistungselektronik

### Getriebeintegrierter elektrischer Antrieb

Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Getriebekonzept erfordert eine elektrische Antriebsmaschine mit vergleichsweise hoher Performance und Dynamik. Der mechanische Eingriff erfolgt dabei über eine Mehrfachschaltstufe. Die elektrische Maschine muss dabei sowohl in mehreren Gängen einen reinen elektrischen Abtrieb ermöglichen, als auch bei anderen Gangstellungen als Boost- und Generatormaschine in Verbindung mit dem Verbrennungsmotor eine Summenabtriebsleistung darstellen, als auch schließlich beiden Schaltungen selbst als Drehmomentabstützung und Synchronisiererelement dienen.

Im Konzeptansatz war für diese Maschine zunächst eine elektrische Antriebsleistung von >200kW im Gespräch, weshalb die Verwendung einer mehrphasigen Maschinentopologie bei gleichzeitiger Integration der Leistungselektronik erwogen wurde. Hier wurde rein aus Maschinensicht ein Leistungsdichtevorteil im magnetischen Kreis im einstelligen Prozentbereich prognostiziert, der bei der extremen Bauraumsituation des leistungsstarken Getriebeantriebs positiv zu einer Lösung beigetragen hätte. Die Möglichkeit zur Ausnutzung dieses Vorteils ist von der konkret umsetzbaren Geometrieform der Maschine abhängig. Die Phasenzahl von 9 Phasen zeigte sich nach den durchgeführten Betrachtungen als technisches Optimum, erfordert aber aufgrund des Verbindungsaufwands zwingend eine Integration der Elektronik, damit der mögliche Leistungsdichtegewinn auch im System realisiert werden kann. Diese erschien jedoch unter den gegebenen Getriebebaugrenzungen nicht als umsetzbar, weshalb trotz des Leistungsdichtenachteils für den elektrischen Antrieb eine 3-phasige Konfiguration zielführend war.

Es wurden zwei verschiedene Getriebeanordnungen im Projektzusammenhang betrachtet, für die jeweils die geeignete elektrische Antriebsmaschine spezifiziert, ausgelegt und aufgebaut wurde. Die Getriebeanordnungen unterscheiden sich durch eine achsparallele Lage der E-Maschine, die dann über eine Zahnradstufe an die Mehrfachschaltstufe einkoppelt, bzw. durch eine koaxiale Anordnung, wobei im Welleninnenraum der E-Maschine Getriebeelemente untergebracht sind. Im Folgenden werden die beiden elektrischen Maschinen mit ihren wesentlichen Eigenschaften vorgestellt:

### Achsparallel angeordnete elektrische Maschine

In achsparalleler Anordnung ermöglicht die Zahnradstufe zur Einkopplung an die Mehrfachschaltstufe eine zusätzlich Übersetzung. Damit kann eine höherdrehende und damit leistungsdichtere Auslegung realisiert werden (s. Abbildung 7). Die hier dargestellte Maschine, welche auch im Prüfstandsbetrieb untersucht wurde, ist für eine niedrige Kühlmittelvorlauftemperatur von 65°C ausgelegt. Da im Thermomanagement des Fahrzeugs ein höheres Kühlmittelniveau von 90°C wünschenswert ist, wurde auch eine um 40 mm verlängerte Variante ausgelegt, die diese Anforderung erfüllen würde.

## Achsparell angeordnete elektrische Maschine

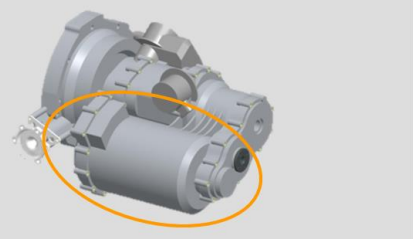
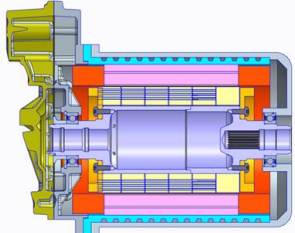
Kenndaten	Drehmoment: 330 Nm (4s), 140 Nm (Dauer)
	Leistung: 130 kW (4s), 75kW (Dauer)
	Max. Drehzahl: 14000 1/min
	DC - Spannung: 300 V
Kühlung EM	Wasserkühlung, Vorlauftemperatur: 65°C, Durchfluss: 6 l/min
Baugröße	Ø220 mm, Länge 327 mm
Einbausituation, Getriebeanordnung	 

Abbildung 7: Achsparell angeordnete E-Maschine nach Baustufe 1

Entsprechend der Auslegungsrechnung (vgl. Abbildung 8) konnten die Anforderungen des Getriebeantriebs mit einer permanenterregten Synchronmaschine mit hohem Reluktanzanteil dargestellt werden. Bei Inbetriebnahme und Vermessung der Performance mit dem aufgebauten Prüfstandsmuster (s. Abbildung 9) ließen sich die Zieldaten der Auslegung noch nicht ganz erreichen, was an der Einschränkung des verfügbaren Fahrzeugenergiesystems lag. Die maximale Peakleistung wurde im Prüfstandsversuch zu 120 kW bestimmt und das gemessene Peakdrehmoment betrug 320 Nm. Wegen des Wechsels auf die Maschine in koaxialer Anordnung wurde die Vermessung hier nicht mehr auf die Grenzperformance erweitert.

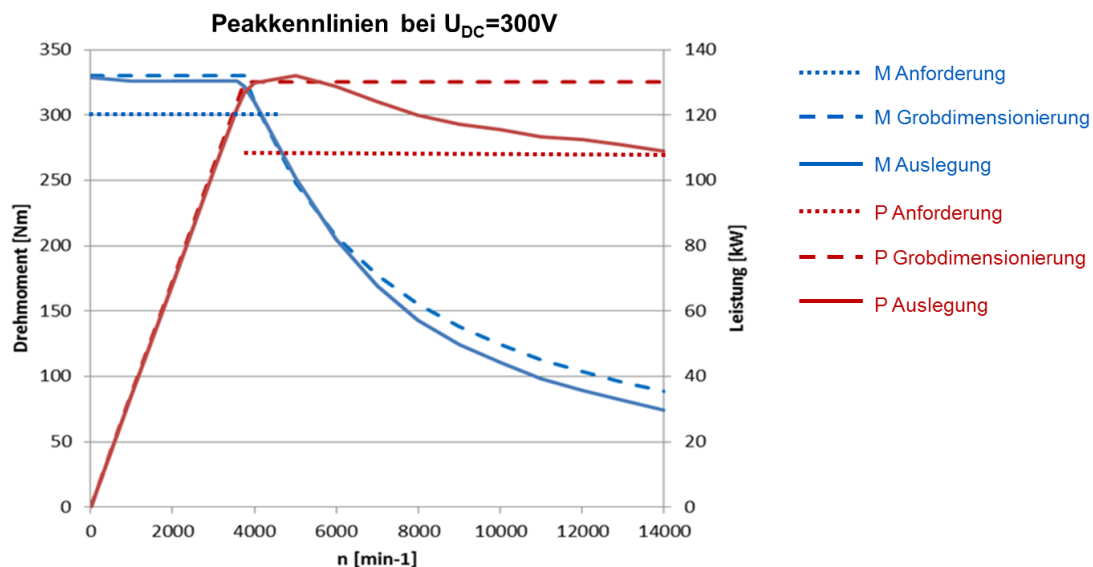


Abbildung 8: Maximalkennlinie der achsparell angeordnete E-Maschine entsprechend Auslegungsrechnung



**Abbildung 9: Prüfstandsmuster der achsparallel angeordneten E-Maschine im Prüfstandsgehäuse**

#### Koaxial angeordnete elektrische Maschine

Die im Vorhaben schließlich als zielführend umgesetzte E-Maschine in koaxialer Anordnung wurde dann entsprechend eingehender untersucht. Die konzeptbedingte Anordnung der Maschine ergab einen minimalen Rotorinnendurchmesser, damit die entsprechende Getriebebaugruppe im Innenraum des Rotors untergebracht werden konnte, und ebenso entsprechend den Packageuntersuchungen aus Bauraumrestriktionen des Fahrzeugs einen maximalen Außendurchmesser. Gleichzeitig ist das Drehzahlband über die direkte Getriebeeinbindung festgelegt. Es ergibt sich im Resultat eine sehr hohe Drehmomentanforderung, die über eine permanenterregte elektrische Maschine mit einer oberflächennahen Magnetanordnung erfüllbar war (Abbildung 10). Die Maschine kann wegen der Getriebeintegration die konzeptbedingte Leistung nicht mit der hohen Leistungsdichte wie bei der hochdrehenden achsparallelen Anordnung darstellen. Allerdings lässt sich so im Gesamtsystem eine höhere Packungsdichte erreichen.

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Messergebnisse zu Maximalkennlinien und Dauerkennlinien, wie sie im Rahmen der Inbetriebnahme und Vermessung der elektrischen Maschine im Prüfstandsversuch ermittelt wurden.

Die Maschine wurde bereits für eine Kühlmittelvorlauftemperatur von 90°C konzipiert. Der notwendige Kühlmanteldurchmesser ermöglicht trotzdem eine hohe Dauerleistung und ein hohes Dauermoment.

## Koaxial angeordnete elektrische Maschine

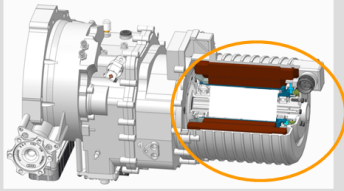
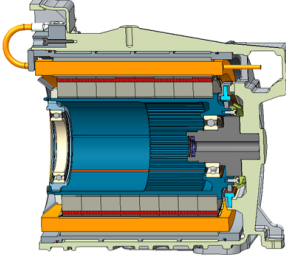
Kenndaten	Drehmoment: 610 Nm (4s), 380 Nm (Dauer)
	Leistung: 125 kW (4s), 85 kW (Dauer)
	Max. Drehzahl: 7000 1/min
	DC - Spannung: 300 V
Kühlung EM	Wasserkühlung, Vorlauftemperatur: 90°C, Durchfluss: 6 l/min
Baugröße	Ø265 mm, Länge 330 mm
Einbausituation, Getriebeanordnung	
	

Abbildung 10: Koaxial angeordnete E-Maschine nach Baustufe 2

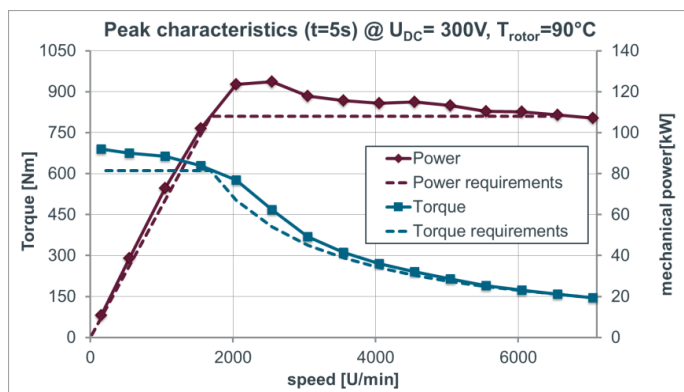


Abbildung 11: Maximalkennlinie der koaxial angeordneten E-Maschine entsprechend Vermessung

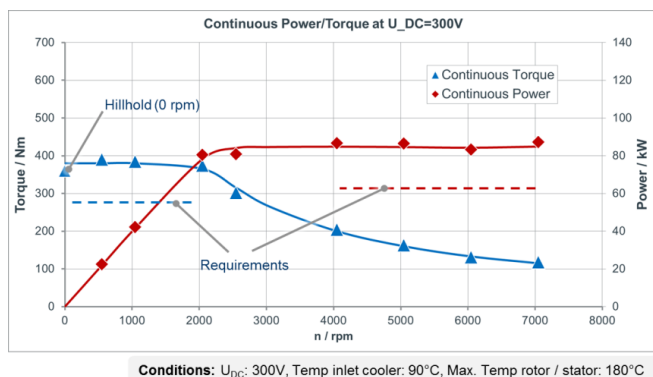
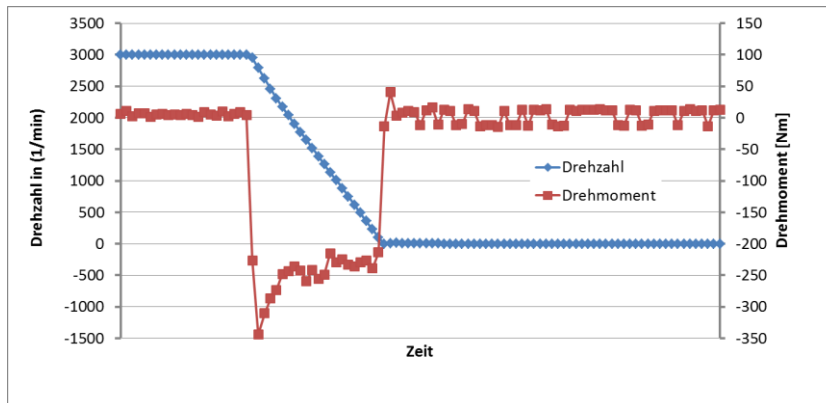


Abbildung 12: Dauerkennlinie der koaxial angeordneten E-Maschine entsprechend Vermessung

Eine besondere Konzeptanforderung an die E-Maschine ist die hohe Dynamik in Bezug auf Drehmomentrampen und Drehzahlrampen sowie eine dynamische Reglerumschaltung von Drehzahl- auf Drehmomentregelung und umgekehrt. Diese Dynamikanforderungen sind physikalisch durch Moment und Leistung unter Berücksichtigung des Trägheitsmomentes möglich. Allerdings sind die Sensorikgenauigkeit

und Reglergeschwindigkeit in der Softwareumsetzung eine Herausforderung. Abbildung 13 zeigt eine im Prüfstandsversuch ermittelte Drehzahlrampe, wie sie schließlich in der notwendigen Dynamik dargestellt werden konnte: Der Drehzahlsprung erfolgt mit  $>8000 \text{ min}^{-1}/\text{s}$  und die Drehmomentrampe weist eine Steilheit von  $>15000 \text{ Nm/s}$  auf. Damit konnte gleichzeitig eine der technologischen Grundvoraussetzungen für die Machbarkeit von neuartigen Getrieben nach dem hier betrachteten Konzept praktisch nachgewiesen werden.



**Abbildung 13: Dynamisches Verhalten der koaxial angeordneten E-Maschine entsprechend Vermessung**

### Arbeitspaket 3: Neue Generation DC/DC-Wandler

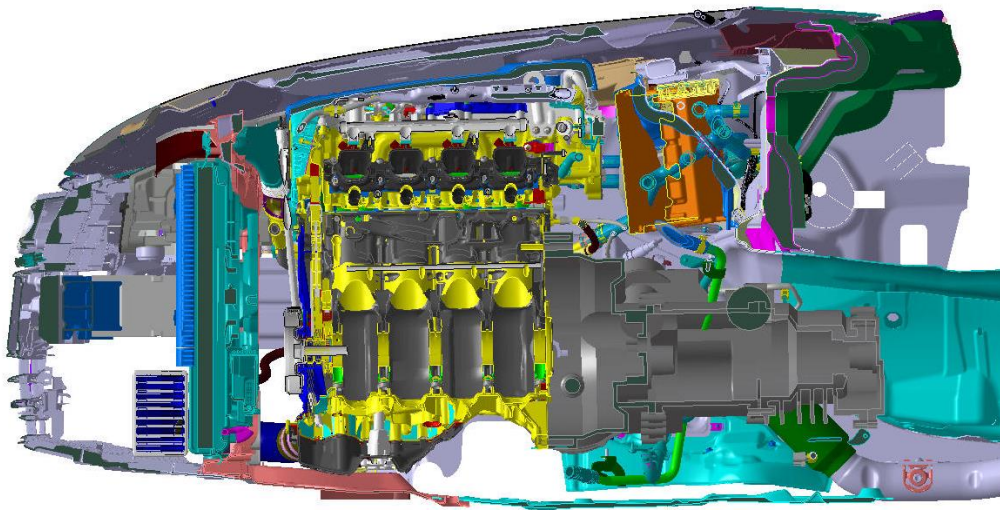
Bei Leistungsanforderungen an den elektrischen Antrieb von mehr als 120 bis 150 kW und typischen Spannungslagen von Traktionsbatterien werden die Grenzen akzeptabler Stromstärken erreicht. Demzufolge ergibt sich die Notwendigkeit von technischen Lösungen für Antriebsleistungen bis 200 kW, um die gesamte Fahrzeugpalette bedienen zu können. Der Einsatz eines DC/DC-Wandlers zur Spannungserhöhung und Stabilisierung am Antrieb wird hier als eine wesentliche Technologie bewertet.

Eine solche zusätzliche Komponente lässt sich mit einer Leistungsdichte von etwa 12-15 kW/Ltr. bei einem Leistungsgewicht von 5-8 kW/kg darstellen. Dabei wird ein maximaler Wirkungsgrad von 97-98% erreicht. Die alternative heute noch nicht zu vertretbaren Kosten und bei nicht hinreichender technologischer Reife einsetzbare SiC-Technologie lässt hier noch eine deutlich verbesserte Leistungsdichte von 30-50 kW/Ltr. prognostizieren.

Im Projekt wurden ein geeignetes Wandlermodell und ein Modell zur Umgebungssimulation als Grundlage zur Bewertung erstellt und grundsätzlich verifiziert. Die Kalibrierung zur Nachbildung verschiedener Unterkomponenten ist teilweise erfolgt. Die elektrische Antriebsleistung im Vario.Drive-Getriebe wurde bei der Konzeptauslegung auf maximal 150 kW beziffert. Für diesen Leistungsbereich wurde der Einsatz eines zusätzlichen DC/DC-Wandlers im Hochvoltnetz zur Spannungsstabilisierung in diesem Antriebskonzept letztendlich nicht als sinnvoll bewertet. Damit ergaben sich im Vorhabensbezug keine weiteren Aktivitäten hinsichtlich einer detaillierteren Auslegung eines DC/DC-Wandlers.

## Arbeitspaket 4: Getriebe

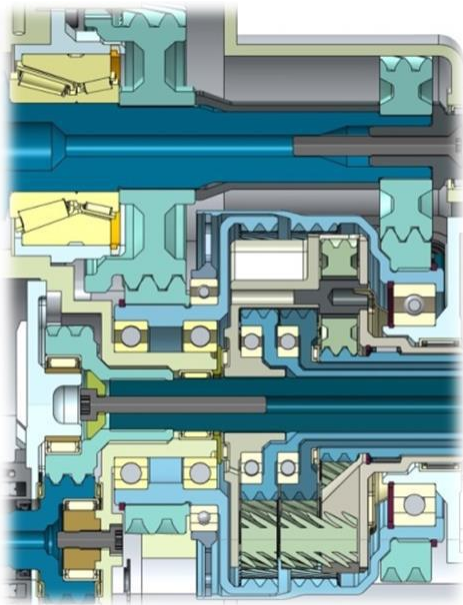
Im Rahmen einer Package-Untersuchung wurde die Herausforderung bearbeitet, ein kompaktes neuartiges Hybridgetriebekonzept inklusive einer performanten E-Maschine in den Tunnelbaurraum eines Serien-PKW zu integrieren. Die Anbindungspunkte der Verbrennungsmaschine, der Achswellen und der Getriebelagerung sollten dabei zwingend erhalten bleiben. Dieses Ziel wurde durch eine geschickte Anordnung der Getriebekomponenten mit einem platzsparenden Lagerungskonzept sowie einer FEM-Bauteiloptimierung des Gehäuses erreicht. Die Baulänge konnte gegenüber dem Seriengertriebe reduziert werden.



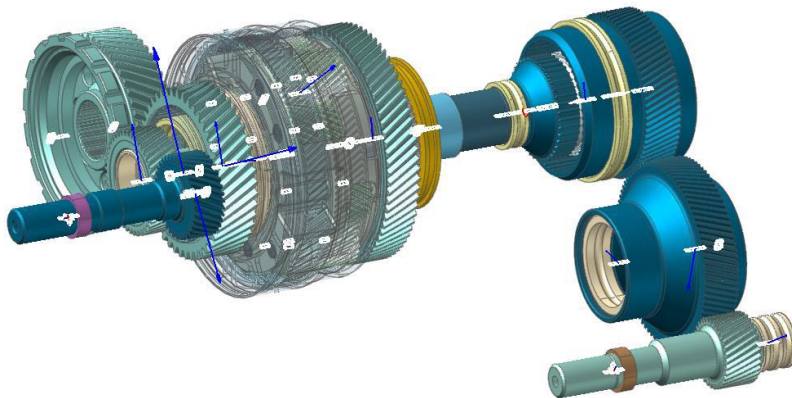
**Abbildung 14: Package des Plug-In-Hybridgetriebes im Vorderwagen**

Die Getriebe-Entwurfskonstruktion hatte zur Aufgabe das neuartige Plug-In-Hybridgetriebekonzept, bestehend aus drei ineinander geschachtelten Planetenstufen mit einem neuartigen Mehrfachschaltelement und einem schlüssigen Lagerungs- und Beölungskonzept unter den Gesichtspunkten einer einfachen Montierbarkeit zu vereinen. Der hierbei durchlaufene Prozess erforderte naturgemäß vielzählige Iterationsschleifen bis das Getriebe den Anforderungen bezüglich Funktion, minimalem Gewicht und Bauraum sowie der geforderten Belastbarkeit im vollen Umfang entsprach. Das Ergebnis ist der in Abbildung 15 dargestellte Rädersatzentwurf. Er beinhaltet die Verzahnungs- und Lagerauslegung, die Belastungsanalyse (siehe Abbildung 16) sowie die Festigkeitsberechnung, welche Gegenstand der Entwurfsarbeiten waren.





**Abbildung 15: Entwurfskonstruktion Rädersatz für das Plug-In-Hybrid-Getriebe**

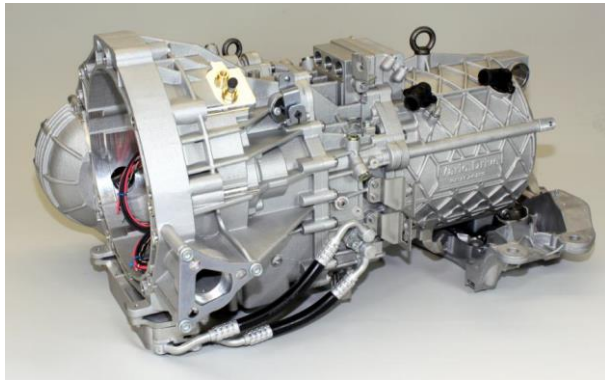


**Abbildung 16: Mehrkörpersimulation zur Belastungsermittlung im Rädersatz für das Plug-In-Hybrid-Getriebe**

Nach der Entwurfskonstruktion des Rädersatzes erfolgte zunächst eine Detailkonstruktion des Mehrfachschaltelements. Dieses besitzt mehrere Schaltstellungen, welche abwechselnd die Sonnen der Planetenstufen mit der E-Maschine oder dem Gehäuse drehstarr koppeln. Die Aktuierung erfolgt optimal über einen elektromechanischen Aktor, der über zwei Zahnradstufen und ein Schraubenge triebe die Positionierung des Mehrfachschaltelements auf zehntel Millimeter genau ermöglicht. Eine zuvor

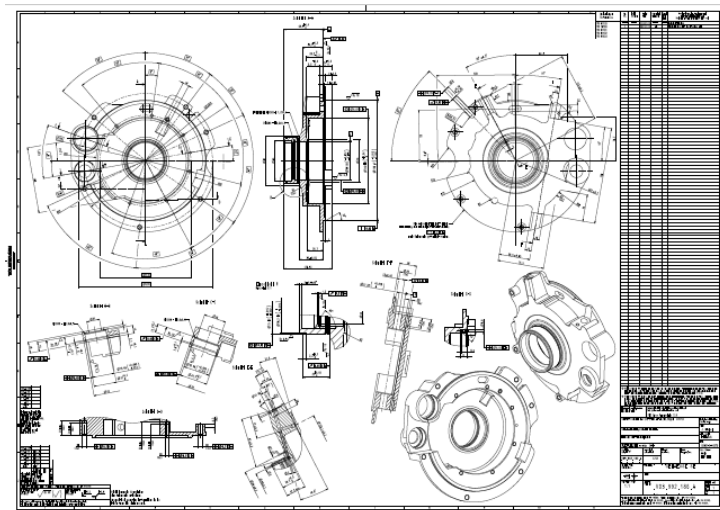
durchgeführte Toleranzanalyse zeigte hierbei die Notwendigkeit die funktionserforderlichen Lager- und Verzahnungsspiele in der Übertragungskette der Aktuierungsmechanik möglichst gering zu halten.

Die Gehäusekonstruktion erfolgte unter den Randbedingungen zur Einhaltung der vorgeschriebenen Lagerungspunkte, Gehäuseteilungsebenen, Schnittstellen bzw. Befestigungspunkte und den zu erwartenden Belastungen. Das fertig bearbeitete Getriebegehäuse ist in Abbildung 17 dargestellt.



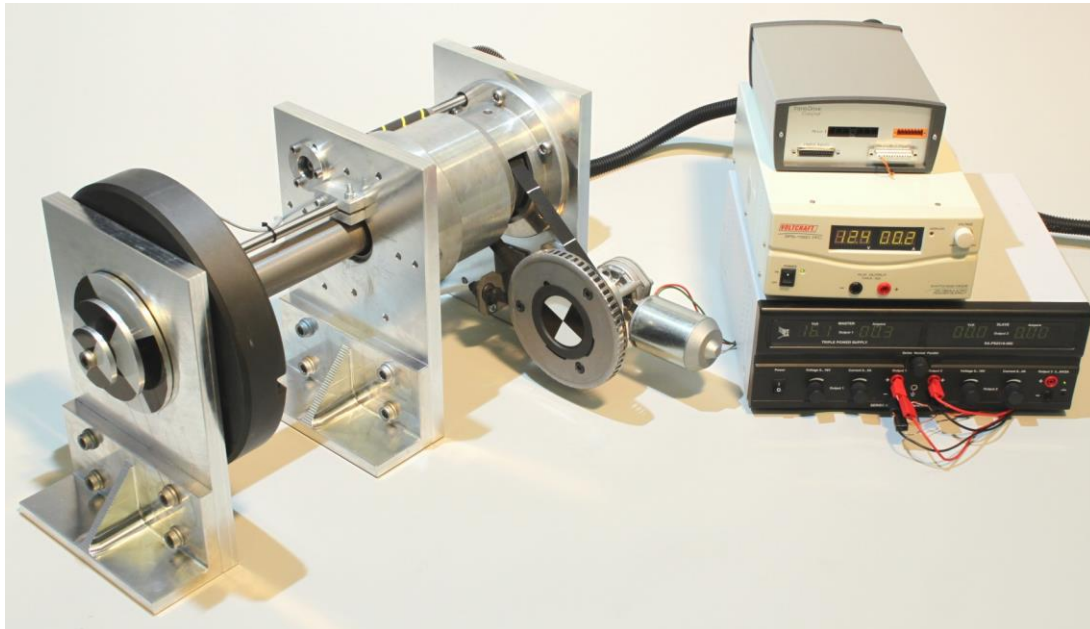
**Abbildung 17: Gegossenes und fertig bearbeitetes Leichtmetallgehäuse**

Die zur Herstellung erforderlichen Fertigungszeichnungen definieren alle speziellen Anforderungen an die Qualität der Bauteile. Neben den geforderten Maßen, Toleranzen und Materialien wurden hier auch Angaben zur Wärmebehandlung oder Prüfverfahren festgelegt. Dieser Arbeitsschritt erforderte große Sorgfalt und damit verbundene Zeitaufwendungen, damit alle Teile termingerecht und passgenau für die Montage zur Verfügung stehen konnten.



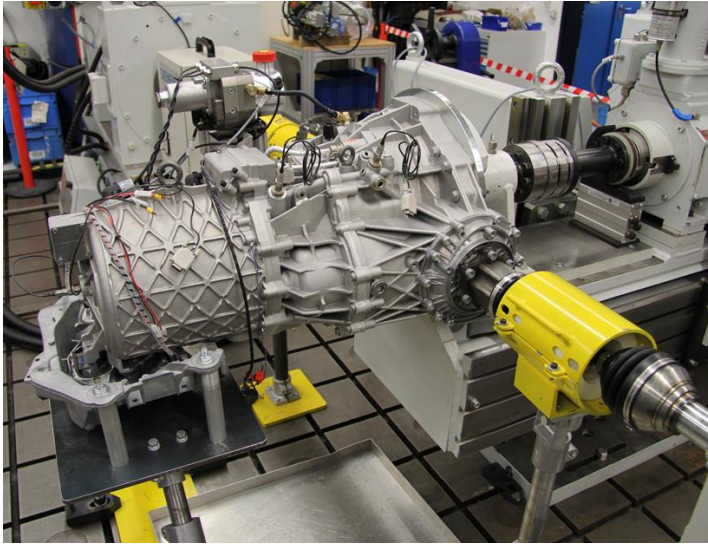
**Abbildung 18: Fertigungszeichnungserstellung – Beispiel Lagerflansch**

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein besonderes Augenmerk auf eine rein softwaregestützte Referenzierung der formschlüssig wirkenden Schaltelemente mit mehreren Schaltstellungen gelegt. Durch speziell ausgearbeitete Algorithmen ist es gelungen, das Schaltelement ohne zusätzliche externe Lagegeber sicher und wiederholgenau in seine definierten Schaltpositionen zu verfahren. Dadurch konnten Kosten für eine separate Sensorik eingespart und die Funktionssicherheit für das Gesamtsystem gesteigert werden. Des Weiteren wurde ein Zahn-auf-Zahn-Erkennungsalgorithmus entwickelt, der in Abhängigkeit der Position und des Motorstromanstiegs das Schaltelement geringfügig zurück bewegt und danach erneut in die Schaltverzahnung einfährt. Damit reagiert das System auch auf eine mögliche Zahn-auf-Zahnstellung selbst korrigierend. Zur Sicherstellung einer korrekten mechanischen Funktion des Mehrfachschaltelements wurde gemäß Abbildung 19 ein Prüfaufbau entwickelt. Dieser ermöglichte es, die Aktuator- und Ansteuersoftware bereits vor Fertigstellung des Getriebes ausgiebig zu testen.



**Abbildung 19: Versuchsaufbau zum Funktionstest des Mehrfachschaltelements**

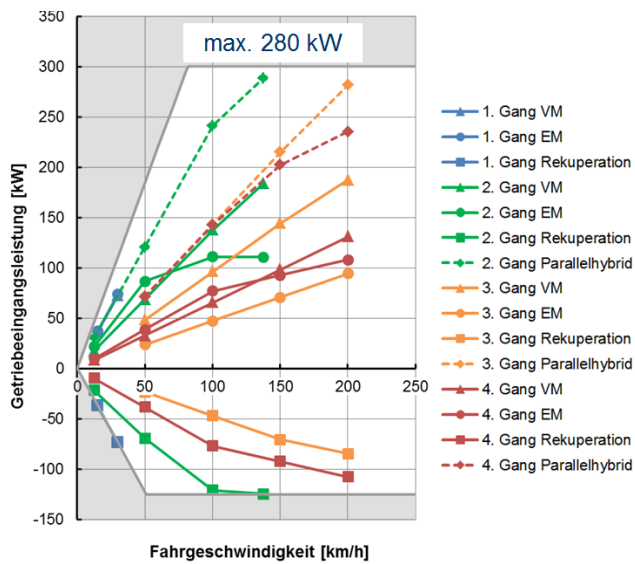
Zur Absicherung der an das Plug-In-Getriebe gestellten Leistungsanforderungen erfolgte auf einem speziellen Getriebepfprüfstand eine Funktions- und Belastungserprobung aller Getriebekomponenten inklusive der Aktorik. Dabei wurden alle Drehzahl- und Drehmomentbereiche in den festen und elektrischen Gängen durchfahren. Ebenso wurden beispielsweise die Funktionen der Schaltelemente, des elektrisch betriebenen Schmierungssystems und der E-Maschine auf ihre einwandfreie Funktion erfolgreich überprüft. Die Abbildung 20 zeigt den Versuchsaufbau des Plug-In-Getriebes auf dem Prüfstand.



**Abbildung 20: Prototyp des Plug-In-Getriebes zur Funktionsüberprüfung auf dem Getriebeprüfstand**

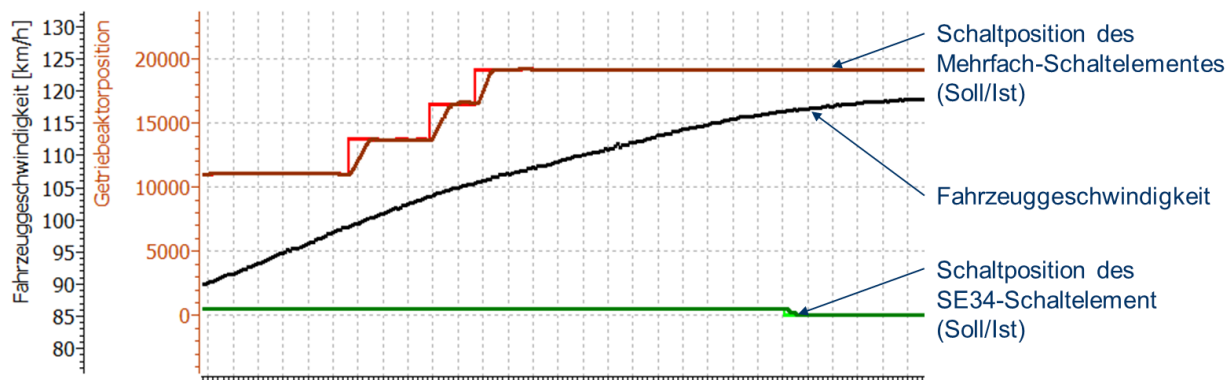
Die sogenannte Vordermaschine simuliert den Verbrennungsmotor und die an den Antriebswellen angeschlossenen Hintermaschinen bilden das Verhalten der zu erwartenden Fahrwiderstände an den Fahrzeugrädern ab.

Insgesamt wurde das Getriebe auf dem Prüfstand mit einem maximalen Achsmoment von bis zu 3000 Nm belastet. Die maximale Leistungsübertragung betrug 280 kW. Die Abbildung 21 zeigt eine Übersicht der im Versuch gefahrenen Betriebspunkte in den vier festen und zwei variablen Fahrstufen.



**Abbildung 21: Leistungstests des Plug-In-Getriebes bei verschiedenen Betriebspunkten auf dem Prüfstand**

Bei der Fahrerprobung wurden die Funktion und die Haltbarkeit unter realen Belastungen unter Beweis gestellt. Abbildung 22 zeigt einen gemessenen Zeitverlauf bei einer Teillastbeschleunigung von 80 auf 120 km/h. Hierbei wurden u.a. die Gänge 2 bis 4 sowie ein variabler Fahrbereich genutzt. In dem Diagramm sind die Schaltpositionen beider Getriebeaktoren dargestellt, welche den Sollanforderungen schnell und zuverlässig folgen. Voraussetzung für dieses Verhalten ist eine durch die E-Maschine herbeigeführte Drehzahlsynchronität der am formschlüssigen Schaltelement beteiligten Wellen.



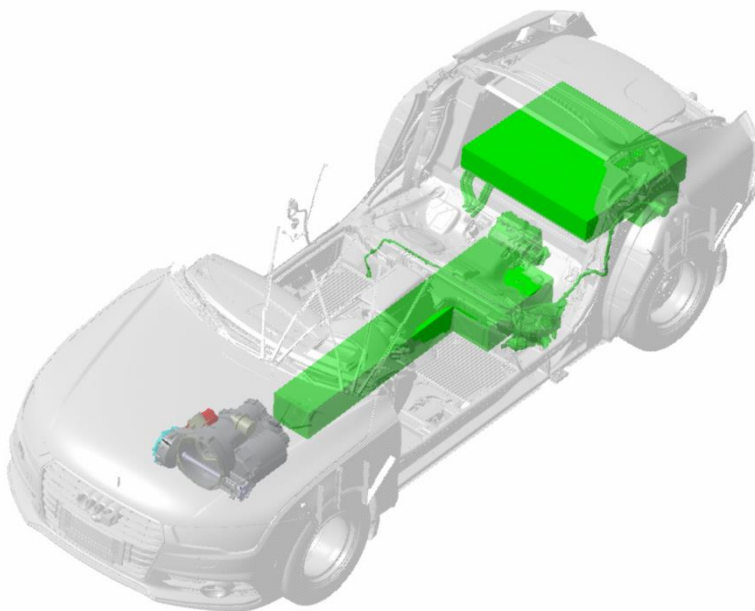
**Abbildung 22: Fahrversuch: Schaltvorgang mit Positionen der Getriebeaktoren bei einer Elastizitätsmessung im Fahrzeug von 80 bis 120 km/h**

## Arbeitspaket 5: Traktionsbatterie

Zu Beginn des Projektes standen in diesem Arbeitspaket die Konzeptauslegung, die Bauraumuntersuchung und das elektrische Design der Traktionsbatterie im Fokus. Wichtiger Bestandteil war hierzu die Auswahl und der Test von Batterie-Zellen, um die Integrationsmöglichkeiten in das Fahrzeug ermitteln zu können.

Zur Ermittlung der geeigneten Zelle wurde ein Zellbenchmark durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene Zellen von mehreren Zellherstellern hinsichtlich Zell-Performance, Einbaumöglichkeit und Verfügbarkeit bewertet. Als zielführend hatte sich eine Pouch-Zelle mit 25Ah erwiesen, die entsprechend für das Projekt ausgewählt wurde. Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und zur Ermittlung des Innenwiderstands wurden Zellcharakterisierungen durchgeführt.

Für die Integration der Batterie ins Zielfahrzeug wurden verschiedene Einbaumöglichkeiten betrachtet, unter anderem Bauräume im Unterboden, Tunnel und Kofferraum. Diese wurden hinsichtlich Umsetzbarkeit und im Hinblick auf geringfügige Karosseriemodifikationen bewertet. Das Ergebnis war, dass Bauräume im Tunnel und im Kofferraum für die Batterieintegration ausgewählt wurden. Hierzu erfolgte in einem iterativen Prozess mit der Getriebe-, E-Maschinen- und Leistungselektronik-Integration eine erste Bauraumfestlegung für die HV-Batterie samt elektrischer Leitungen. Diese ist in der Abbildung 23 in einer CAD-Grafik dargestellt. Die Bauräume für die Batterie belaufen sich auf ca. 100 l im Tunnel und ca. 100 l im Kofferraum.



**Abbildung 23: Bauräume für die HV-Batterie (grün)**

Im Anschluss lag der Fokus darin, basierend auf der vorherigen Konzeptauslegung das Design der HV-Batterie final zu entwickeln und abzuschließen. Ferner wurden Validierungsmessungen zur Bestätigung des Grundkonzeptes durchgeführt.

Es wurde ein elektrisches Design zur sicheren Verschaltung von zwei Teil-Batterie-Komponenten entwickelt. Hierbei wurde vor allem auf eine kompakte Bauweise unter Berücksichtigung von geltenden Sicherheitsnormen Wert gelegt. Ferner wurden für die auftretenden hohen Ströme (~900 A) geeignete elektrische Komponenten ausgewählt. Insbesondere wurden die Stromschienen, die Verbindungsleitungen und Gehäuse im Hinblick auf elektromagnetische Verträglichkeit entsprechend ausgelegt.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt war die Realisierung eines effizienten Thermomanagements, um die hohe Leistungsfähigkeit von bis zu 250 kW wiederholt darstellen zu können. Hierzu wurden, um das geeignete Kühl-Design zu finden, umfangreiche CFD-Simulationen des Batteriekühlroutings durchgeführt. Die Grundlösung besteht darin, die Zellen möglichst zellnah, d.h. mit einem sehr kleinen thermischen Übergangswiderstand vom Kühlmedium zur Batterie-Zelle, zu kühlen. Die exakte Temperaturverteilung der Zellen und der Batteriemodule sowie die Druckverteilung innerhalb der Kühlkanäle wurden simuliert und im Design berücksichtigt.

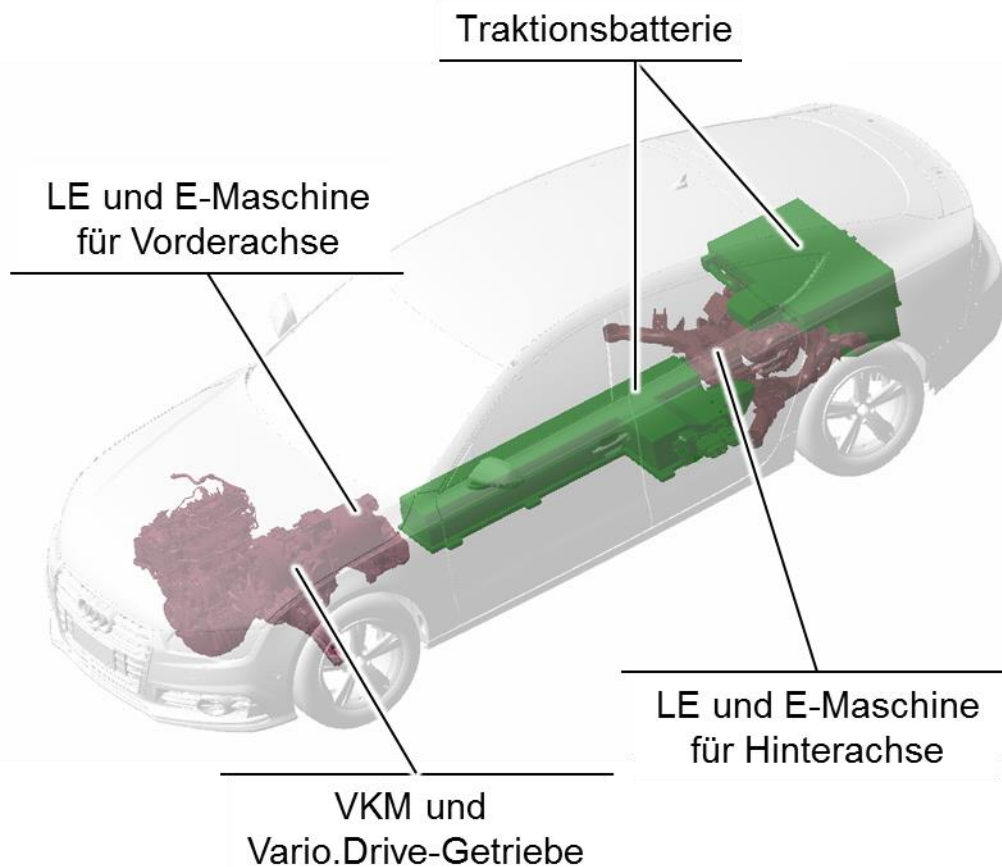
Um letztendlich die HV-Batterie hinsichtlich einer Fahrzeuganwendung zu ertüchtigen, wurden mehrfach FEM-Festigkeitsberechnungen von strukturelevanten Komponenten durchgeführt. Ziel war es, die Teil-Batterie-Komponenten im Tunnel-Bereich des Fahrzeugs und die Teil-Batterie im Kofferraum auf die erforderlichen Beschleunigungswerte auszulegen und zu ertüchtigen. Die Ergebnisse der FEM-Simulation wurden hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit analysiert und einzelne Komponenten entsprechend iterativ neu ausgelegt.

Zur optimalen Bauraumausnutzung und unter Berücksichtigung von hinreichend wenig verschiedenen Bauteilen wurden insgesamt drei verschiedene Module konstruiert, die sich maßgeblich nur in der Größe unterscheiden. Im Tunnel-Bereich des Fahrzeugs werden 3s3p- und 7s3p-Module eingebaut, im Kofferraum hingegen 7s3p- und 10s3p-Module.

Schließlich wurden sämtliche Zellen und Systemkomponenten beschafft, HV-Batterien für zwei Fahrzeuge aufgebaut und erfolgreich ins Fahrzeug integriert. Zur Nutzungs-Freigabe wurden detaillierte Charakterisierungsmessungen und Tests der HV-Batterie durchgeführt.

## Arbeitspaket 6: Thermisch optimierter Antriebsstrang

Im Rahmen des Projektes Vario.Drive erfolgte die gesamtheitliche Konzeptionierung und Auslegung der Kühlkreise des elektrischen Antriebsstranges sowie des Klimatisierungssystems. Ferner wurde der aus dem Spenderfahrzeug übernommene Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors dahingehend modifiziert, eine zusätzliche Schnittstelle zum Beheizen des Fzg.-Innenraumes zu erhalten. Abbildung 24 zeigt die zu Grunde liegende Übersicht aller betrachteten Komponenten des Antriebsstranges. Das Konzept besteht aus drei Kühlkreisen die folgendermaßen bezeichnet sind: HT (Hochtemperatur), NT(Niedertemperatur) 1 und NT 2.



**Abbildung 24: Übersicht der in das Kühlungs- und Klimatisierungskonzept einbezogenen Antriebskomponenten**

Die NT2-Kühlung umfasst die Bereitstellung der benötigten Kühlung sowohl für die Leistungselektroniken als auch für die Elektromotoren zum Antrieb von Vorder- und Hinterachse. Die Konzeptionierung und Auslegung wurde auf Basis der erwarteten Verlustleistungen dieser Antriebskomponenten sowie deren Vorgaben für die maximal zulässigen Kühlwasservorlauftemperaturen durchgeführt. Abbildung 25 verdeutlicht die Anordnung der Komponenten im Kühlkreislauf sowie die Positionierung der weiteren Systemkomponenten wie Ausgleichsbehälter, Kühlwasserpumpe und NT2-Wasserkühler im Frontend.



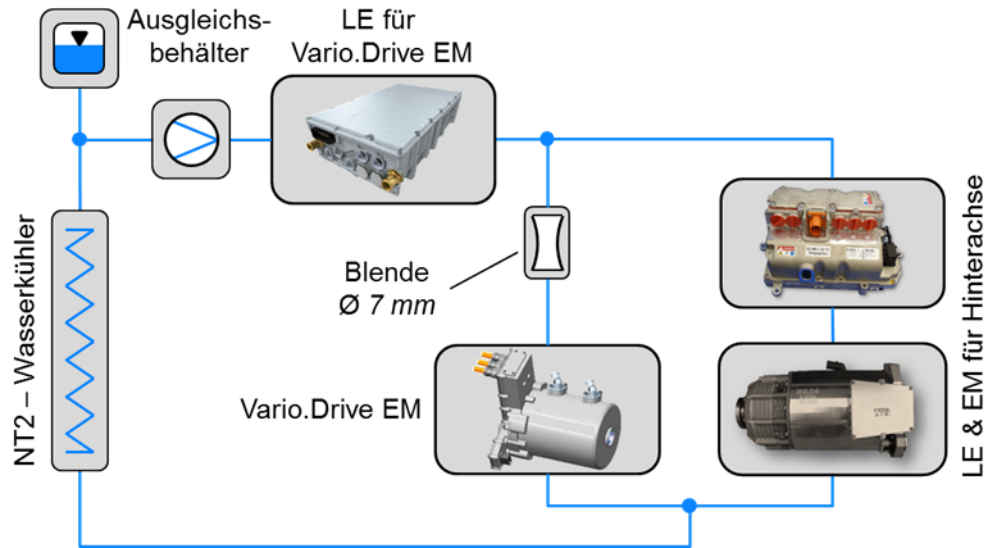


Abbildung 25: Skizze des im Vario.Drive installierten NT2-Kühlkreises

Die Dimensionierung, insbesondere des NT2-Wasserkühlers, erfolgte mit definierten Simulationen und orientiert sich an den thermischen Grenzbetriebsbedingungen, wie sie in den Spezifikationen vorgegeben sind. Abbildung 26 führt beispielhaft Ergebnisse auf, auf deren Grundlage eine Bewertung des Auslegungsstandes durchgeführt wird.

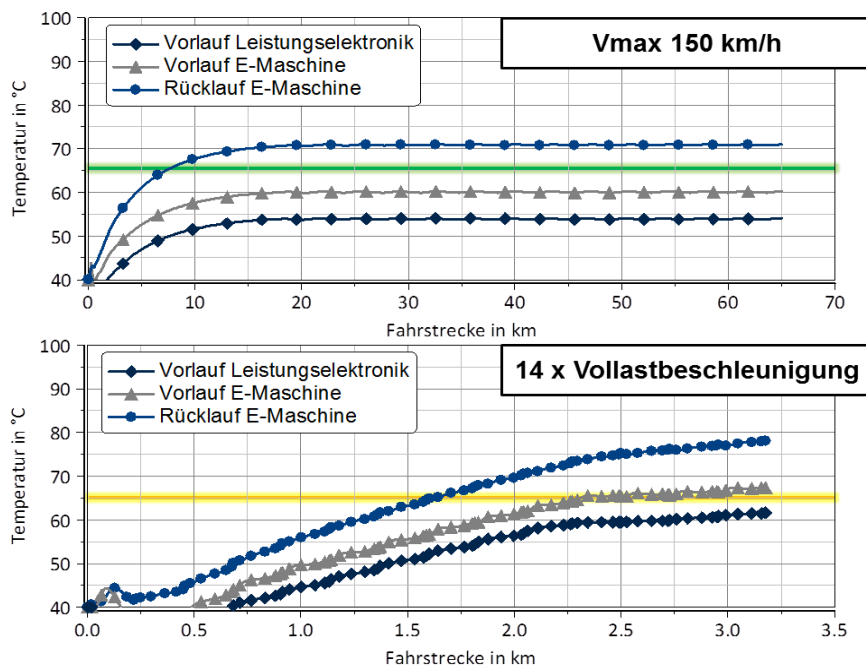
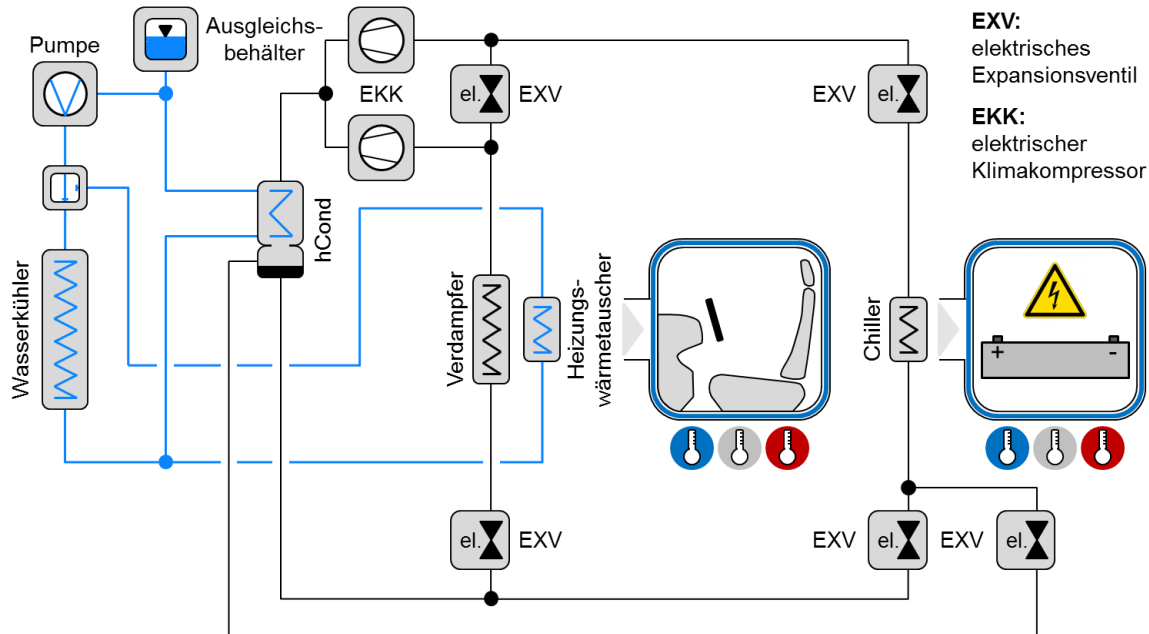


Abbildung 26: Beispielhafte Ergebnisse einer simulierten Grenzbetriebsituation

Zusätzlich zur optimierten Kühlung des Antriebsstrangs stellte das Klimatisierungssystem einen weiteren wesentlichen Schwerpunkt im Arbeitspaket 6 dar. Es wurde ein komplexes System entwickelt, das

gleichzeitig eine hohe Kälteleistung sowohl für den Fahrzeug-Innenraum als auch für die Kühlung der HV-Batterie zur Verfügung stellen kann. Schlüsselfunktionen kommen hierbei den beiden parallel verschalteten, elektrischen Klimakompressoren (EKK) sowie dem Gas-Wasser-Wärmetauscher (hCond) zu (siehe Abbildung 27).



**Abbildung 27: Verschaltungsbild des Klimatisierungssystems**

Die elektrischen Klimakompressoren ermöglichen durch ihre parallele Verschaltung die erforderliche, hohe Kälteleistung. Weiter ermöglichen es die beiden EKK in Kombination mit dem hCond, den Fahrzeug-Innenraum und die HV-Batterie zu beheizen, sodass im gesamten Fahrzeug auf weitere elektrische Zuheizter verzichtet werden kann. Erreicht wird diese Heizfunktion dadurch, dass die Abwärme der in Betrieb befindlichen Kompressoren vom Kältemittel aufgenommen und über den hCond in den NT1-Kreislauf überführt werden kann (NT1 in Abbildung 27 durch blaue Linien dargestellt). Vom NT1-Kreislauf wird die Abwärme in den Heizungswärmetauscher geführt und so der Fahrzeug-Innenraum beheizt. Eine vollständige Übersicht aller möglichen Betriebsmodi zeigt Abbildung 28. Hier wird ersichtlich, dass auch Kombinationen aus Kühl- und Heizfunktionen gleichzeitig wahrgenommen werden können, was es ermöglicht, die Verlustwärme einer Komponente als effektive, energieeffiziente Heizleistung wieder zu verwenden.

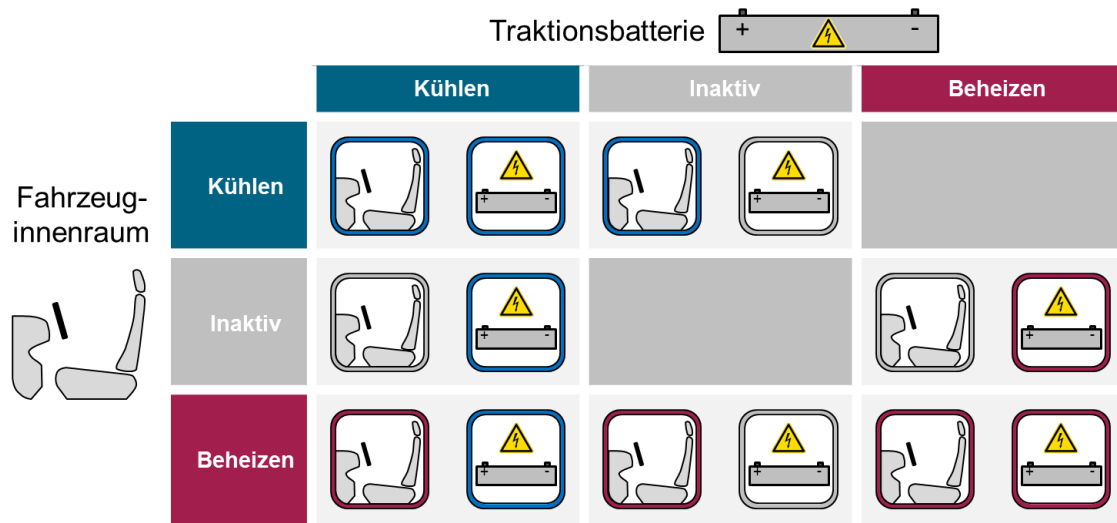


Abbildung 28: Mögliche Betriebszustände des Klimatisierungssystems (rot: beheizen, blau: kühlen, grau: inaktiv)

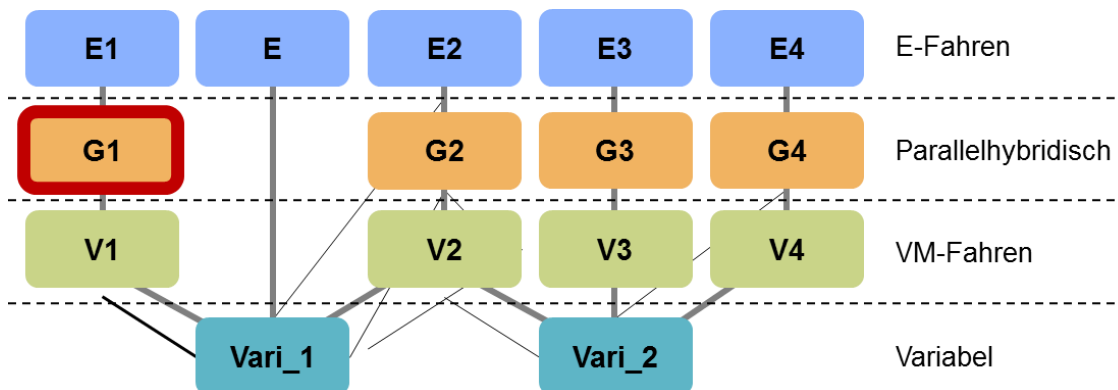
## Arbeitspaket 7: Antriebssteuerung u. Betriebsstrategie

Das Vario.Drive-Konzeptfahrzeug ist mit einem elektrischen Allradantrieb ausgestattet, der per Software aktiviert wird um verschiedene zukünftige Antriebskombinationen in nur einem Fahrzeug zu erproben. Insbesondere geht es hierbei um die Darstellung des Fahrverhaltens mit reinem Frontantrieb als mögliche Basisvariante eines Serienantriebes.

Der Antriebsstrang des Vario.Drive an der Vorderachse umfasst 5 grundsätzliche Betriebsmodi:

- E-Fahren: nur die E-Maschine ist mit verschiedenen Übersetzungen mit den Vorderrädern verbunden, der Verbrennungsmotor ist abgekoppelt und ggf. ausgeschaltet.
- Parallelhybridisch: Verbrennungsmotor und E-Maschine sind mit verschiedenen Übersetzungen mit den Vorderrädern verbunden.
- VM-Fahren: nur der Verbrennungsmotor ist mit verschiedenen Übersetzungen mit den Vorderrädern verbunden, die E-Maschine ist abgekoppelt.
- Variabel: Verbrennungsmotor und E-Maschine sind über ein Planetengetriebe mit den Vorderrädern verbunden. Die Drehzahlen beider Komponenten überlagern sich, sodass eine stufenlose Übersetzungsverstellung möglich ist (sog. eCVT-Modus).
- Neutral: keine Antriebskomponente ist fest mit dem Abtrieb verbunden.

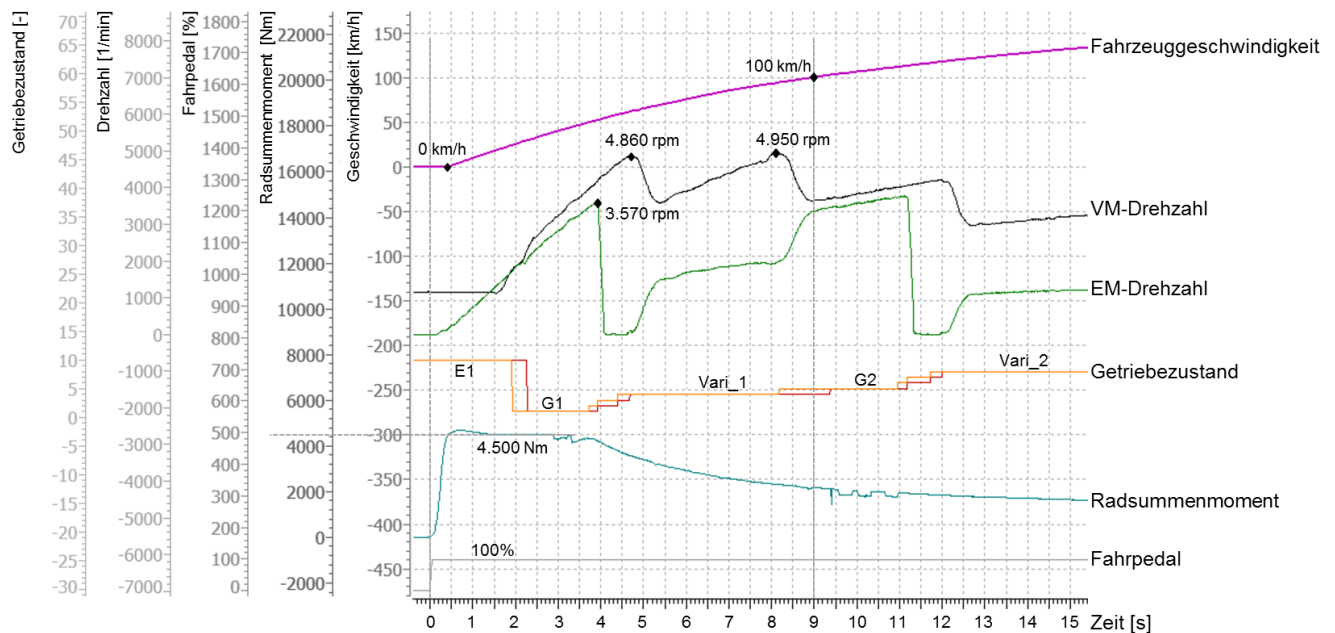
Abbildung 29 zeigt die Betriebsmodi des Vario.Drive-Getriebes.



**Abbildung 29: Betriebsmodi des Vario.Drive-Getriebes**

Das Rückwärtsfahren sowie das vorwärts Anfahren erfolgen elektrisch. Die Hybridsteuerung entscheidet über den Start des Verbrennungsmotors über den Riemen-Starter-Generator. Ab einer Geschwindigkeit von etwas mehr als 10 km/h kann in den parallelhybridischen Betrieb im 1. Gang gewechselt werden. Zusätzlich bietet das Antriebskonzept die Möglichkeit, auch bei kleineren Geschwindigkeiten den Verbrennungsmotor anzukoppeln und im variablen Modus den Ladezustand der Batterie über einen längeren Zeitraum konstant zu halten (z.B. im Stau mit hohen Klimatisierungsanforderungen).

Abbildung 30 zeigt die Messung einer Fahrzeugbeschleunigung mit elektrischem Anfahren (E1), Ankoppeln des Verbrennungsmotors in den hybridischen ersten Gang (G1) sowie weitere Schaltvorgänge.

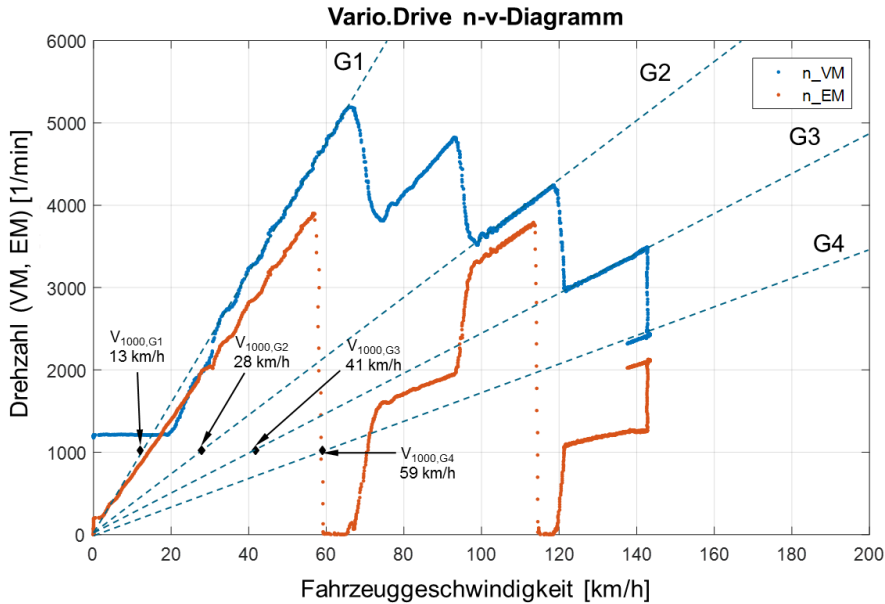


**Abbildung 30: Messung einer Fahrzeugbeschleunigung**

Zwischen dem ersten und zweiten parallelhybridischen Gang (G1, G2) liegt ein synthetischer Zwischengang, der im variablen Betriebsmodus Vari\_1 emuliert wird. Da in diesem Fall die Drehzahl des Verbrennungsmotors mit der Fahrzeuggeschwindigkeit mitgeführt wird, stellt sich dieser Betriebsmodus für den Fahrer vergleichbar mit einem festen Gang dar. So wird das Getriebe, das mechanisch nur über vier Gänge verfügt, z. B. als komfortables Sechsganggetriebe empfunden. In Abbildung 30 ist u. a. am Drehzahlverlauf des Verbrennungsmotors zu erkennen, dass in dem hier gezeigten Geschwindigkeitsbereich vier Gänge erfahrbar sind, obwohl hier nur zwei mechanisch tatsächlich genutzt werden (G1, G2). Diese Eigenschaft vereint ein komfortables Fahren und Schalten mit einem geringeren Getriebeaufwand und dabei niedrigeren Kosten.

Bei der Schaltung vom 1. Gang (G1) in den variablen Modus (Vari\_1) werden diverse Zwischenzustände durchfahren. Da die Schaltelemente im Getriebe formschlüssig ausgeführt sind, ist eine Drehzahlsynchronisation über die Hochvolt-E-Maschine zum Schließen einer Schaltverzahnung erforderlich. Zum Öffnen einer formschlüssigen Schaltverzahnung ist die Drehmomentfreiheit sicher zu stellen, was ebenfalls die E-Maschine durch Drehmomentüberlagerung übernimmt.

Abbildung 31 zeigt eine Gegenüberstellung von Verbrennungsmotordrehzahl und Fahrzeuggeschwindigkeit im n-v-Diagramm. Bei dieser Beschleunigung im oberen Teillastbereich ist die Emulation eines Zwischenganges zwischen G1 und G2 gut zu erkennen. Auch die Anpassung bzw. Synchronisierung der E-Maschinendrehzahl bei den Schaltvorgängen ist ersichtlich.



**Abbildung 31: n-v-Diagramm (Messung)**

Bei einer Fahrt im unteren Teillastbereich erfolgt eine möglichst schnelle Schaltung in den variablen Betriebsmodus, um eine niedrige und akustisch kaum wahrnehmbare Verbrennungsmotordrehzahl zu ermöglichen. Diese wird geschwindigkeitsabhängig angepasst, sodass trotz laufendem Verbrennungsmotor im Hybridbetrieb ein dem E-Fahrzeug sehr ähnlicher Fahreindruck entsteht. Auch der Übergang in den zweiten variablen Betriebsmodus erfolgt ohne spür- und hörbare Schaltung. Daher verfügt das Fahrzeug neben einer nennenswerten elektrischen Reichweite im E-Fahren auch über eine deutlich vergrößerte Reichweite mit BEV-ähnlichem Fahreindruck im hybridischen Teillastbetrieb.

Bei einer Vollastbeschleunigung wird eine sportliche Drehzahlapplikation in Anlehnung an einen Parallelhybrid mit kurzen Schaltzeiten und VM-Drehzahlanpassung durch die E-Maschine genutzt.

Beim Fahren mit kleiner Leistungsanforderung (z.B. im Stadtverkehr oder bei Überlandfahrt mit konstanter Geschwindigkeit) kann es aus gesamtenergetischer Sicht sinnvoll sein, den Verbrennungsmotor auszuschalten und ein elektrisches Fahren ohne lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermöglichen. Hierzu wird aus jedem hybridischen Gang (G1, G2, G3, G4) in den entsprechenden Betriebsmodus für elektrisches Fahren gewechselt (E1, E2, E3, E4). Eine Besonderheit bildet der Betriebsmodus „E“, bei dem ein elektrisches Fahren sowohl mit hohen Anfahr Drehmomenten als auch bis zu einer Geschwindigkeit von 150 km/h ohne Schaltvorgänge ermöglicht wird. Im Fahrzeug wird dieser Betriebsmodus vom Fahrer durch einen entsprechenden E-Mode-Taster angewählt.

Die gesamte Betriebsstrategie wurde im Vorfeld in einer Software-in-the-Loop-Umgebung (SiL) vollständig getestet. Abbildung 32 zeigt hierzu den grundlegenden Aufbau. Hierbei wurden für diesen Antrieb spezielle Modelle für Planetengetriebe, Schaltelemente und Regelungsarten von Komponenten

weiterentwickelt und während der Fahrzeugbetriebnahme perfektioniert, um eine möglichst realitätsnahe Antriebsstrang-Simulation zu erzielen.

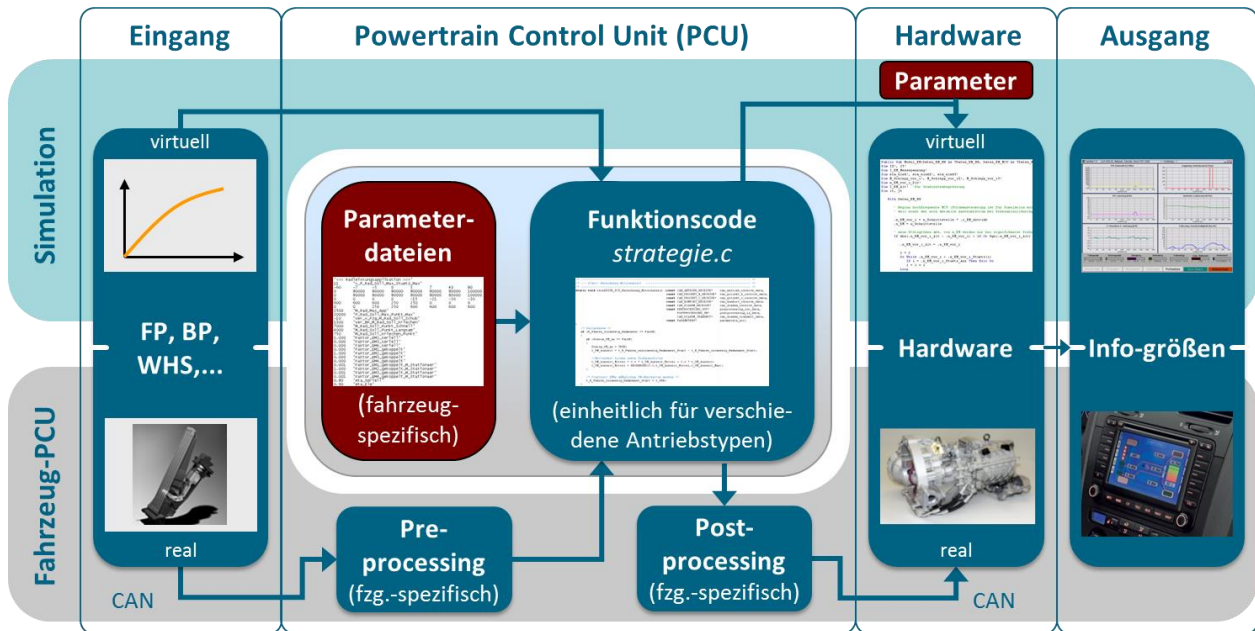


Abbildung 32: Software-in-the-Loop-Umgebung (SiL)

Die Funktionsentwicklung und -applikation erfolgte im Rahmen einer Grundapplikation innerhalb der SiL-Umgebung am Arbeitsplatz, wobei auch Optimierungsverfahren zum Einsatz kamen. Der Vorteil einer solchen virtuellen Funktionsentwicklung liegt zum einen darin, dass die Auswirkung von Funktionen und deren Applikation auf das Fahrverhalten beurteilt werden kann, ohne den prototypischen Antriebsstrang zum Beispiel bei Fehlansteuerung zu gefährden. Zum anderen wird hierdurch die Weiterentwicklung von Funktionen bei eingeschränkter Fahrzeugverfügbarkeit bzw. durch einen größeren Personenkreis sichergestellt. Eine Feinapplikation, die sich im Wesentlichen auf Themen wie Fahrkomfort und subjektiver Fahreindruck fokussieren, erfolgte schließlich später im Fahrbetrieb zunächst auf einem speziellen Testgelände.

Da in diesem Fahrzeug mehrere prototypische Steuergeräte, Aktoren und Sensoren zum Einsatz kommen, wurde deren Kommunikation im Vorfeld in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung (HiL) getestet und die Grundfunktionen der jeweiligen Steuergeräte entwickelt. An einem Prüfaufbau konnte schon zu einem frühen Zeitpunkt der vollständige Hochlaufprozess, der grundsätzliche Betrieb sowie das Herunterfahren des Fahrzeugs in Verbindung mit einer Restfahrzeugsimulation erarbeitet und nachgewiesen werden. Zudem konnten komplexe Softwareanalysen durchgeführt werden ohne Komponentenschäden der Getriebehardware zu riskieren.

Für das Sicherheitskonzept des Gesamtfahrzeugs wurde zunächst eine Gefahren- und Risikoanalyse (GuR) durchgeführt. Zur Durchführung wurde auf die Erfahrung eines externen Partners zurückgegriffen. Aufbauend auf der GuR wurden die Sicherheitsziele abgeleitet und der sichere Zustand des Gesamtfahrzeugs definiert. Anschließend wurde das Sicherheitskonzept erarbeitet. In der Umsetzungsphase wurde eine Teilung in zwei Bereiche vorgenommen. Der erste Bereich umfasst die Abarbeitung der Sicherheitsziele, um Gefährdungen für den Fahrer auszuschließen. Der zweite Bereich umfasst Verfahren und Funktionen, die Abweichungen vom Normalbetrieb des Antriebsstrangs frühzeitig erkennen, Gegenmaßnahmen einleiten und damit Schädigungen am Antriebsstrang und frühzeitig gefährliche Situationen für Personen verhindern. Die Ersatzreaktionen teilen sich dementsprechend auf zwei Bereiche auf. Ein Bereich ist das Einleiten des sicheren Zustands um die Sicherheit für Personen zu gewährleisten. Dies kann beispielsweise durch Detektion von massiven Fehlmomenten im Antrieb oder durch Kommunikationsausfälle und damit dem Verlust der Steuerbarkeit der Komponenten geschehen. Die Reaktionen zur Erkennung von Abweichungen zum Normalbetrieb als zweiter Bereich reichen von der Aktivierung alternativer Ansteuerverfahren bis hin zur Reduzierung der Antriebsleistung des Fahrzeugs (z.B. bei überdurchschnittlich langen Schaltzeiten). Weiterhin wurde eine Eskalationsstrategie entwickelt. Als erstes wird immer versucht durch rechtzeitige Erkennung von Abweichungen Schädigungen und gefährliche Situationen zu vermeiden. Treten jedoch Systemzustände auf, in denen Sicherheitsziele verletzt werden, wird das Fahrzeug in den sicheren Zustand überführt. In Tests wurde die Funktion dieser Sicherheitsfunktionalität nachgewiesen. Durch Auswertung von Messungen und dem Erprobungsbetrieb wurde die Erkennung von Abweichungen vom Normalbetrieb nachgewiesen.

Zur Anzeige von Fehlern für den Fahrer wurden Warnmeldungen in das Kombiinstrument implementiert, um die Fahrerinformation sicherzustellen. Weiterhin wurden im Fahrer- Informations- System (FIS) spezielle Informationsseiten vorgesehen, in denen die aufgetretenen Warnungen und Fehler anhand von Fehlernummern identifiziert werden können.

Um eine möglichst gute Transparenz des Antriebes für den Fahrer zu schaffen, wurde ein spezielles Anzeigeconcept entwickelt. Das Fahrer-Informations-System (FIS) bzw. Human-Machine-Interface (HMI) sieht neben einem Hauptbildschirm mit den wesentlichen Informationen wie Batterieladestatus, eingelegter Gang, Antriebskonfiguration (Einachs- oder Allradbetrieb) und wesentliche physikalische Größen der Komponenten (Drehzahl, Drehmoment, Leistung, Strom) auch komponentenspezifische, detaillierte Darstellungen vor. So kann sich der Fahrer jederzeit über den aktuellen Zustand der einzelnen Komponenten informieren, den Energieverbrauch kurz-, mittel- oder langfristig überwachen sowie Einsicht in die letzten gemeldeten Fehler und Warnungen nehmen.

Weiterhin sind Eingabemöglichkeiten vorgesehen, womit der Fahrer das Verhalten des Fahrzeuges beeinflussen kann. Hier seien beispielsweise das Reservieren eines Energieinhaltes der Hochvoltbatterie für eine bestimmte Fahrtstrecke oder die Möglichkeiten, auf das Schaltverhalten Einfluss zu nehmen, genannt.



Die Umsetzung der erprobten HMI-Funktionen zeigt Abbildung 33.

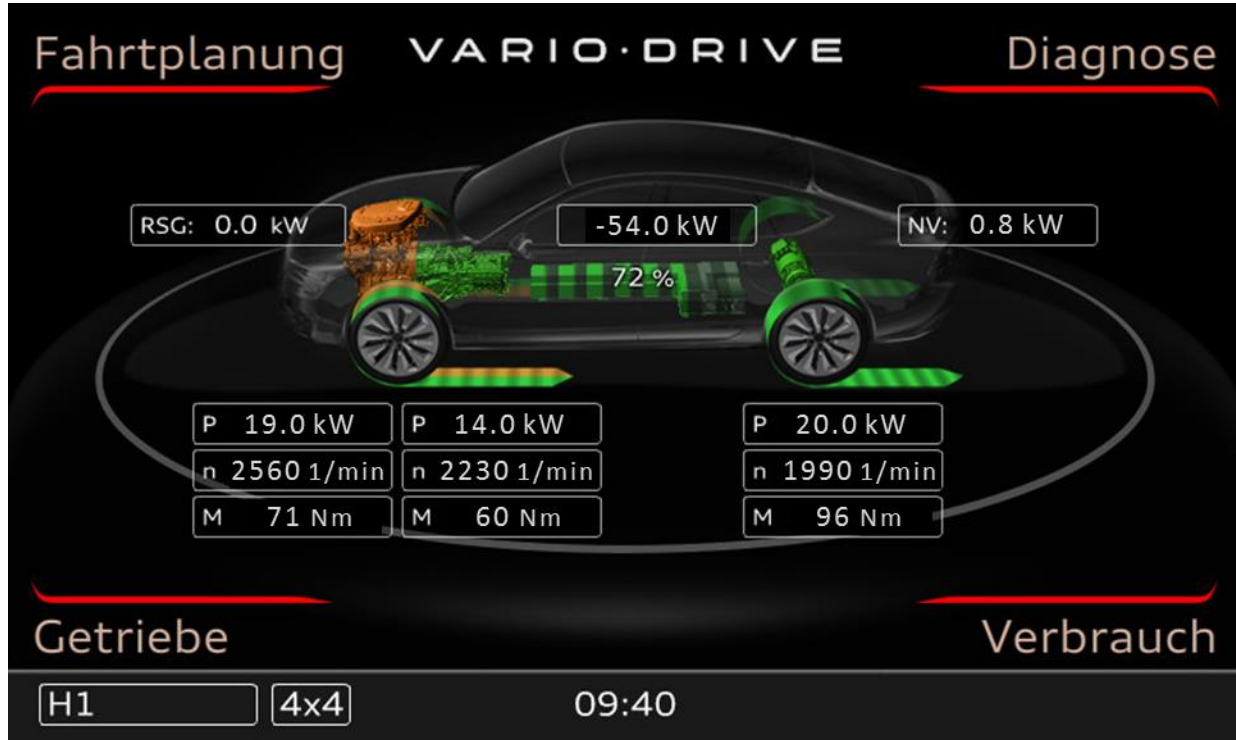


Abbildung 33: Fahrer-Informations-System (Hauptseite mit Komponenteninformationen)

Die Fahrzeuginbetriebnahme erfolgte schrittweise:

- Überprüfung der Verkabelung und Vernetzung sowie aller Analog- und Digitalein- und -ausgänge
- Überprüfung der CAN-Vernetzungsstruktur und der dazugehörigen Kommunikation
- Test und Diagnose der Serienkomponenten im Fahrzeug
- Hochlauftest der 12V-Verbraucher mit dem Sicherheitssteuergerät
- Not-Aus-Test
- Einprägen von gezielten Störungen und Überprüfen der Wirksamkeit der Überwachungsmechanismen (CAN-Kommunikation, Freigabeleitungen, Abschaltanforderungen usw.)

Auch die Inbetriebnahme der Hybrid-Komponenten erfolgte Schrittweise:

- Hochvolt-Inbetriebnahme inkl. Isolationsmessungen
- Test der Hochvoltkomponenten auf deren Funktionalität (Andrehen der vorderen und hinteren E-Maschine, Betrieb des Klimakompressors, Vorladung und Betrieb der HV-Batterie)
- Abgleich von Fahrwerkskomponenten und Bremsen
- Inbetriebnahme der grundlegenden Kühlungsfunktion

- Fahrzeuginbetriebnahme auf einem Rollenprüfstand im Einachsbetrieb und anschließend im Allradbetrieb
- Inbetriebnahme der Ladefunktion
- Fahrzeuginbetriebnahme für den internen Betrieb mit stark eingeschränkten Komponentengrenzen und reduzierter Fahrzeuggeschwindigkeit
- Schrittweises Erweitern der ansteuerseitigen Komponenten- und Systemleistungsgrenzen
- Erhöhung der Funktionalität um weitere Fahrzustände / Betriebsmodi





















Bei der Fahrzeugapplikation wurde zunächst mit rein elektrischem Fahren begonnen. In einem weiteren Schritt wurde der Verbrennungsmotorstart erprobt und das Schließen der K0-Kupplung während der Fahrt hinsichtlich Akustik und Komfort appliziert. Im Anschluss folgte die Abstimmung des Schaltvorgangs von einem parallelhybridischen Gang in das variable Fahren. Mit der Anpassung der Getriebefunktion mit den Zwischenzuständen (z.B. Abkopplung der E-Maschine), wurde bei niedriger Geschwindigkeit erstmals eine radmomentneutrale 1-2-Schaltung mit formschlüssigen Schaltelementen ermöglicht. Im weiteren Verlauf wurden das Anfahren im variablen Modus (z.B. bei leerer Batterie) sowie weitere Getriebezustände bzw. Gänge dargestellt. Den Abschluss bildet die Umschaltung von verschiedenen Antriebskonfigurationen sowie deren Applikation im Fahrbetrieb (z.B. Einachsbetrieb/Allradbetrieb, Hybridbetrieb/E-Fahrzeug-Betrieb, verschiedene Charakteristiken in Wählhebelstellung D und S usw.).

Inhalt der anschließenden Erprobungsfahrten war neben der Beurteilung von Akustik und Komfort auch das Verhalten unter diversen Umwelteinflüssen, wie z.B. in einer Regensimulationsanlage mit monsunartigen Regenfällen. Auch wurden Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Schaltungen über die Erprobungslänge von über 3.000 km durchgeführt. Hierzu sind alle Fahrzeuge mit einem Datenlogger ausgestattet und ermöglichen über ein intelligentes Auswertesystem eine lückenlose Analyse des Antriebes.

## Arbeitspaket 8: Aufbau u. Inbetriebnahme Demonstrationsfahrzeug

Der Aufbau der beiden Demonstrationsfahrzeuge (im Folgenden Prototypen genannt) erfolgte auf Basis zweier Audi A7 (Basisfahrzeuge) aus der Serienfertigung. Um die Komponenten im Fahrzeug unterzubringen und die Crashesicherheit der Prototypen zu gewährleisten sind an den Karosserien der Basisfahrzeuge umfangreiche Modifikationen vorgenommen worden. Dazu wurden beide Fahrzeuge bis auf den Rohbau zerlegt.

Aufgrund der deutlichen Erhöhung der Fahrzeugmasse lag ein Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes in der Crashertüchtigung der Fahrzeuge. Abbildung 34 gibt eine Übersicht zu den untersuchten, gesetzlich vorgeschriebenen Lastfällen sowie eine Indikation zum Erfüllungsgrad der unterschiedlichen Gütekriterien. Diese beziehen sich vorwiegend auf die Sicherheit der Fahrzeuginsassen sowie der HV-Batterien.

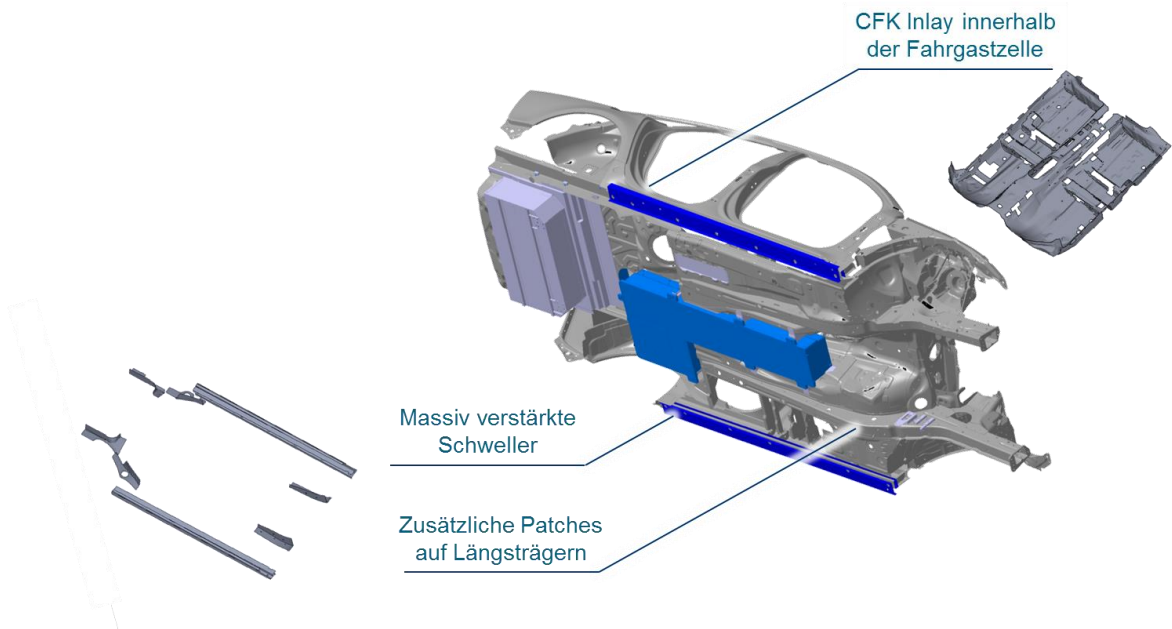
Lastfall	Details	Insassen	Beschleunigung Batterie	Verformung Batterie	Intrusion
ECE-R94 ODB 56 km/h	Front-Crash gegen Barriere mit Überlappung 	OLC 			
ECE-R12-WALL 53 km/h	Front-Crash gegen starre Wand 	OLC 			
ECE-R95 MDB 50 km/h	Seiten-Crash gegen Barriere 	Überlebensraum 			
ECE-R32-WALL 53 km/h	Heck-Crash gegen Barriere 				

**Abbildung 34: Auswahl untersuchter Crashlastfälle sowie Indikation zum Erfüllungsgrad der Gütekriterien**

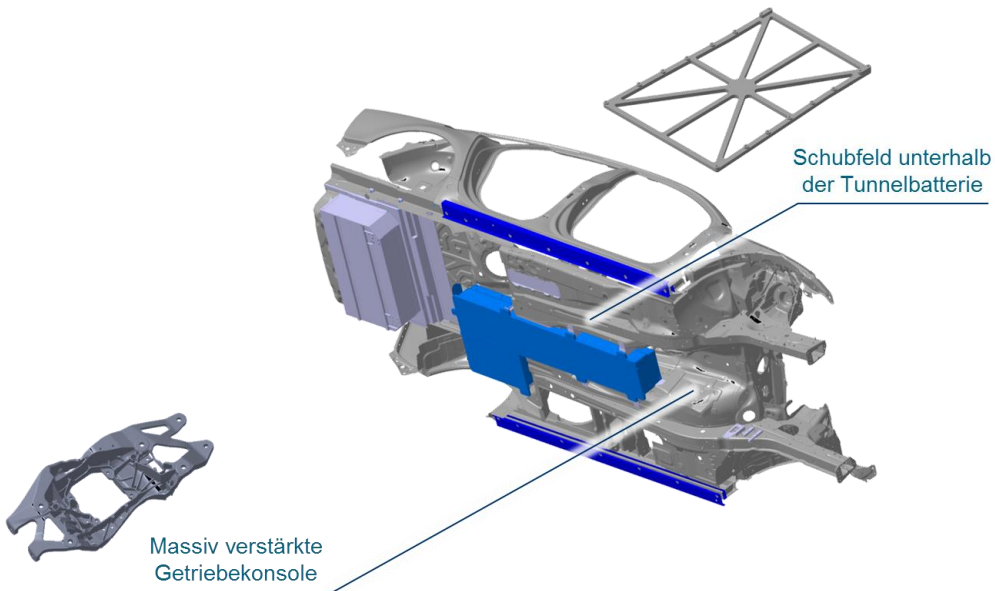
Zur Erfüllung der oben aufgeführten Kriterien „Beschleunigung Batterie“, „Verformung Batterie“, sowie „Intrusion“ waren eine Reihe von Verstärkungs-, bzw. Versteifungsmaßnahmen notwendig. Diese bestehen im Wesentlichen aus zusätzlichen Verstärkungen in den Schwellern sowie der Fahrzeuglängsträger in den Bereichen Rücksitzbank und Übergang zum Vorderwagen. Weiter war der Einsatz einer verstärkten Getriebekonsole erforderlich, die über vier zusätzliche Anbindungspunkte direkt an die Längsträger auf Höhe des Getriebetunnels verfügt. Über diese Maßnahmen hinaus wurde die Bodengruppe des Rohbaus mit Hilfe eines CFK-Inlays zusätzlich versteift. Hierzu wurde das Inlay direkt innerhalb der Bodengruppe laminiert, herausgetrennt und in einem Autoklaven ausgehärtet, um anschließend wieder in die Bodengruppe eingeklebt zu werden.

Um insbesondere die Tunnelbatterie im Falle eines Seitencrashes zu schützen, wurde ein Schubfeld unterhalb der Batterie montiert, das den Fahrzeugtunnel in Breitenrichtung zusätzlich versteift. Die Abbildung 35 und Abbildung 36 stellen die hier aufgeführten Verstärkungs- bzw. Versteifungsmaßnahmen

innerhalb der Konstruktionsdaten des Rohbaus dar. Weiter zeigen die Abbildung 37 und Abbildung 38 die real am Prototypen ausgeführten Maßnahmen.



**Abbildung 35: Verstärkungsmaßnahmen am Rohbau, Schweller, Längsträger und CFK Inlay**



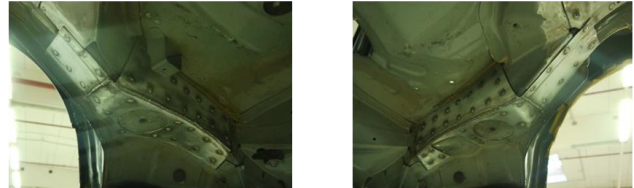
**Abbildung 36: : Verstärkungsmaßnahmen am Rohbau, Getriebekonsole und Schubfeld**



Linker Schweller



Patches auf den Längsträgern im Bereich des Vorderwagens



Patches auf den Längsträgern im Bereich der Rücksitzbank

**Abbildung 37: Im Fahrzeug ausgeführte Maßnahmen im Bereich der Schweller und der Längsträger**



CFK Inlay innerhalb der Fahrgastzelle



Schubfeld unter Tunnelbatterie



Getriebekonsolle mit erweiterten Anbindungspunkten

**Abbildung 38: Im Fahrzeug ausgeführte Maßnahmen im Bereich des Unterbodens (Schubfeld, Getriebekonsolle) sowie CFK-Inlay in der Bodengruppe**

Über die Arbeiten zur Crashesicherheit am Rohbau im demontierten Zustand der Fahrzeuge hinaus standen der Aufbau und die Inbetriebnahme der Prototypen im Fokus dieses Arbeitspaketes. Hierzu erfolgte die Montage und Integration der folgenden, wesentlichen Antriebsstrangkomponenten in den vorbereiteten und verstärkten Rohbau:

- Antriebseinheit Vorderachse bestehend aus Verbrennungsmotor, Getriebe und vorderer E-Maschine
- Hinterachs-Hilfsrahmen mit vormontiertem Getriebe und hinterer E-Maschine

- HV-Traktionsbatterien in Fahrzeug-Tunnel und modifizierter Reserveradmulde
- HV-Infrastruktur, bestehend aus den Leistungselektroniken für Vorder- und Hinterachse, HV-Ladeklappe, sowie den erforderlichen HV-Leitungen
- 12V-Kabelbaum, 12V Infrastruktur und CAN-Struktur
- Thermomanagementsysteme, bestehend aus Hochtemperatur-Kühlwasserkreislauf, Niedertemperatur-Kühlkreisläufen 1 & 2, Kältemittelkreislauf und Batteriekühlkreislauf
- Abgasanlage

Zusätzlich wurden die Umfänge zum Themengebiet Fahrzeuginnenausstattung, bestehend aus Sitzen, Armaturenbrett, Innenverkleidungen, Teppich, Fahrzeughimmel und Kofferraum montiert bzw. auf die veränderten Bedingungen in den Prototypen hin angepasst. Abbildung 39 zeigt die beiden vollständig aufgebauten und in Betrieb genommenen Fahrzeuge.



Fahrzeug I



Fahrzeug II

**Abbildung 39: Fotos der beiden fertig aufgebauten und in Betrieb genommenen Prototypenfahrzeuge**

## **4. Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan**

Entgegen dem ersten Arbeitsplan wurde, wie bereits in Abschnitt 3 erläutert, im Vorhaben keine mehrphasige Maschinentopologie umgesetzt. Andererseits war der Aufwand in dem Arbeitspaket durch den Wechsel in der Getriebekonfiguration (von achsparalleler zu coaxialer Anordnung) und die damit verbundene Neuauslegung und den Neuaufbau der Komponenten gegenüber dem ursprünglichen Plan für die Komponentenbereitstellung E-Maschine und Leistungselektronik deutlich erhöht. Dieser Aufwand konnte durch die Nichtweiterverfolgung des DC/DC-Wandler-Konzeptes in Arbeitspaket 3 kompensiert werden.

Im Arbeitspaket 6 wurde zusätzlich zu den im Arbeitsplan beschriebenen Umfängen das Klimatisierungssystem mitberücksichtigt (vergleiche Beschreibung in Abschnitt 3), so dass ein gesamtheitliches und intelligentes Thermomanagement entwickelt wurde und die Systemgrenze nicht nur auf die Antriebsstrangkühlung beschränkt war.

Die zum Arbeitspaket 8 im Abschnitt 3 beschriebenen Umfänge zum Aufgabengebiet „Crashverhalten“ stellen in Teilen eine Abweichung zu den im Arbeitsplan definierten Arbeitsumfängen dar. Hierbei liegt die Abweichung vor allem in der Tiefe der Detailbetrachtungen und dem Umfang der ergriffenen Versteifungs- und Verstärkungsmaßnahmen begründet, die im Arbeitsplan mit geringerem Aufwand abgeschätzt worden sind.

Eine Abweichung bzw. Erweiterung stellt die Einsatzfähigkeit des im Rahmen dieses Projekts entwickelten Antriebskonzeptes dar, und zwar ist dieses nicht nur im oberen Fahrzeugsegment einsetzbar sondern auch für das Mittelklassensegment mit hohen Absatzzahlen (z.B. Audi A4) geeignet.

## **5. Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik**

Im Rahmen des 14. Internationalen CTI-Symposiums wurde Ende 2015 erstmals über eine „neue Gattung von Hybridgetrieben“ unter dem Begriff „Dedicated Hybrid Transmission (DHT)“ diskutiert. Zu diesem Zeitpunkt waren die Konzeptarbeiten zu dem hier beschriebenen Ansatz bereits abgeschlossen und die Konstruktionsphase schon weit fortgeschritten. Mitte 2016 erschien in der Automobiltechnischen Zeitschrift ein Artikel über DHT-Getriebe, wobei dort im Wesentlichen drei Konzepte diskutiert wurden:

- das leistungsverzweigte System von Toyota mit zwei E-Maschinen ohne Schaltelemente,
- das Voltec-II-Hybridgetriebe von General Motors mit zwei E-Maschinen und zwei Schaltelementen
- der Future-Hybrid-Antrieb von AVL mit einer E-Maschine und vier Schaltelementen

Der im Rahmen dieses Fördervorhabens beschriebene Ansatz geht in Bezug auf Komplexitätsreduktion und Funktionsintegration noch weiter. So kommen neben nur einer E-Maschine auch formschlüssige Schaltelemente zum Einsatz, sodass auf eine Mechatronik zur hydraulischen Ansteuerung von reibschlüssigen Kupplungen vollständig verzichtet werden kann. Zudem werden mit diesem Antrieb Dynamik, Komfort und Effizienz in einer Weise miteinander verbunden, die so im internationalen Stand der Technik bisher nicht bekannt ist.

Die im Rahmen des Projekts dargestellten E-Maschinentypen entsprechen dem Stand der Technik auch für automotive Anwendungen. Die starke Einbindung der E-Maschine in die Getriebefunktion („dedicated hybrids“) mit den Ansprüchen an Robustheit, Funktionalitäten und Dynamik ist eine neue Tendenz für aktuellste Antriebskonzepte. Insbesondere die hier umgesetzte hohe Bauraumintegration von großer E-Maschine und Getriebeelementen ist hier als Forschungsgegenstand eine neue Betrachtung.

DC/DC-Wandler sind grundsätzlich bekannt und bei asiatischen Fahrzeugherstellern in Zweimaschinen-Hybridkonzepten in Serie umgesetzt. Bei hohen Leistungsanforderungen in reinen batterieelektrischen Fahrzeugen werden entweder Batterien höherer Spannungslage diskutiert oder sehr kurze Verbindungen zwischen Batterie und Antrieb umgesetzt, die allerdings das Fahrzeugkonzept entsprechend stark diktieren. Leistungen bis 150kW werden üblicherweise noch bei variabler Spannungslage im Bereich von 300V-400V realisiert, so dass das im Vorhaben weiterverfolgte Konzept unter Verzicht einer zusätzlichen Wandlerkomponente sich bzgl. Leistungs-DC/DC-Wandler sinnvoll in den Stand der Technik eingliedert.

Derzeitige teilelektrifizierte Serienfahrzeuge (PHEV) weisen eine elektrische Reichweite von bis zu 50 km auf. Dies ist maßgeblich auf Grund der gesetzlichen Verbrauchsnormung als auch auf die Kosten des elektrifizierten Antriebsstrangs zurückzuführen. Das hier dargelegte Konzept weist für einen PHEV eine hohe elektrische Bruttoenergiemenge von 27,6 kWh auf. Zusätzlich kann die Batterie eine Peakleistung von 250 kW und eine performante Kühlung aufweisen. Folglich ist dieses Konzept für ein PHEV einmalig im Hinblick auf Reichweite und Leistung.



Das hier vorgestellte Klimatisierungssystem stellt ein neuartiges Konzept dar. Ist der Betrieb von Systemen, die Abwärme einer Komponente zum Beheizen einer anderen einsetzen prinzipiell bereits bekannt, eröffnet der Einsatz des eigens entwickelten hConds weitere Möglichkeiten. An erster Stelle ist hier der vollkommene Verzicht auf weitere elektrische Zuheizer zu nennen, wie sie z.B. in Elektrofahrzeugen mit Wärmepumpen trotzdem erforderlich sind (bspw. eGolf mit Wärmepumpenoption, etc.). Weiter ist auch das Beheizen der Traktionsbatterie anzuführen, das, analog zum Fzg.-Innenraum, allein über die Abwärme des elektrischen Klimakompressors erfolgen kann.

## **6. Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf**

Mit dem Nachweis der grundlegenden Funktion – zugkraftneutrales Schalten mit formschlüssigen Schaltelementen durch eine hohe Integration von E-Maschine, Getriebe und Verbrennungsmotor – ist der Grundstein für kompakte, effiziente, komfortable und dynamische Antriebe gelegt.

Mit diesem Prinzip lassen sich auch PHEV-Antriebe für andere Fahrzeugsegmente ableiten und so ein Beitrag für nachhaltige CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität leisten. Insbesondere für Fahrzeuge im Massenmarkt ergibt sich damit ein Hebel für die Reduzierung von CO<sub>2</sub>.

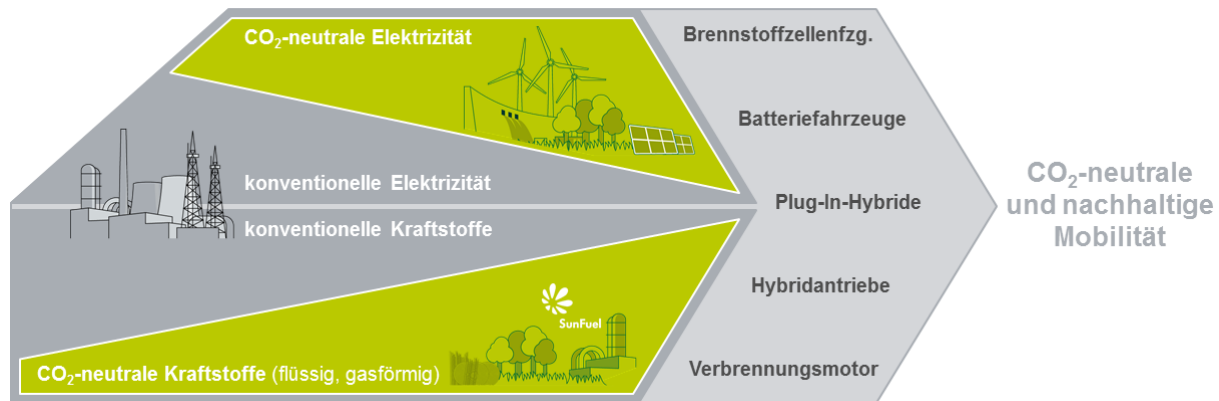
Das neuartige Getriebekonzept birgt erhebliches Potenzial zur Kosten-, Gewichts- und Bauraum-Einsparung, da aufwendige reibschlüssige Kupplungen und Mechatroniken durch die Verwendung von formschlüssigen Schaltelementen entfallen. Dieses Konzept reduziert ebenso nachhaltig die Getriebeverluste. Im Rahmen des hiesigen Projekts wurde ein erster Funktionsprototyp mit diesem neuen „Dedicated-Hybrid-Transmission“-Ansatz entwickelt. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Sicherstellung der geforderten Robustheit und Dauerhaltbarkeit sowie in der zuverlässigen Gewährleistung der Regelbarkeit und Dynamik der Antriebseinheit. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Industrialisierung der neuartigen Schaltelemente. Es sollten die Toleranzketten verkleinert und die Verfahrensweisen zur Massenproduktion identifiziert sowie optimiert werden.

Die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse im Hinblick auf ein leistungsfähiges HV-Batterie-Design können bei Volkswagen in zahlreiche Projekte einfließen. Speziell das Wissen hinsichtlich Thermomanagement könnte zukünftig Verwendung finden. Darüber hinaus bietet das Projekt eine fundierte Basis, um neuartige Forschungsbatterien aufzubauen und zu entwickeln.

Das umgesetzte Thermomanagement (Antriebsstrangkühlung und Fahrzeugklimatisierung) ermöglicht sowohl Effizienzsteigerungen bei der Beheizung des Fahrzeug-Innenraumes bzw. der HV-Batterie, als auch ein gleichzeitig hoch leistungsfähiges Klimatisierungssystem. Ferner bietet das hier vorgestellte System die Möglichkeit, mit einem klassischen Wärmepumpenkonzept kombiniert zu werden. Diese Maßnahme würde eine weiter erhöhte Effizienz im Heizbetrieb bewirken, ohne negative Auswirkungen auf die maximale Kühlleistung erwarten zu müssen.

## **7. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)**

Volkswagen hilft aktiv mit, den globalen Ausstoß des klimarelevanten CO<sub>2</sub> zu senken und gleichzeitig die Abhängigkeit vom Erdöl zu reduzieren. Dafür wurde von Volkswagen eine Antriebs- und Kraftstoffstrategie entwickelt, die auf eine CO<sub>2</sub>-neutrale und nachhaltige Mobilität zielt (Abbildung 1).



**Abbildung 40: Volkswagen Antriebs- und Kraftstoffstrategie**

Der erste Pfad dorthin führt über flüssige und gasförmige Kraftstoffe, deren Erzeugung zukünftig verstärkt auf regenerativem, CO<sub>2</sub>-neutralem Weg erfolgen wird. Diese werden in hocheffizienten Verbrennungsmotoren genutzt, deren CO<sub>2</sub>-Emissionen durch unterschiedliche Ausprägungen der Elektrifizierung noch verringert werden.

Der zweite Pfad führt über Elektrizität als Energieträger, die zunehmend aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden wird. Dieser kann in Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt werden.

Hier zeigt sich das Potenzial von Plug-In Hybridantrieben, welche die Vorteile des Energieträgers Elektrizität mit den Vorzügen flüssiger und gasförmiger Energieträger verbinden.

Daher werden PHEVs (Plug-In Hybrid Electric Vehicles) eine zentrale Rolle bei der Verwirklichung nachhaltiger Mobilität durch den Volkswagen Konzern einnehmen.

Im Rahmen des hiesigen Projekts galt es das Potential von Plug-In Hybrid-Technologien für Fahrzeuge mit hohen Leistungsanforderungen im oberen Fahrzeugsegment zu untersuchen. Hierbei lag der Fokus darin, die hohen Leistungsanforderungen mit dem geringen Bauraum dieser Fahrzeugklasse zu kombinieren, die Kosten und das Gewicht des Antriebs im Gegensatz zu heutigen Plug-In-Konzepten zu reduzieren sowie den Fahrkomfort bzw. das „E-Fahrzeug-Feeling“ (keine spürbaren Gangwechsel) bei gleichzeitig hoher Effizienz sicherzustellen. Dieses Spannungsfeld konnte mit dem im Rahmen dieses Projekts entwickelten Antriebskonzept erfolgreich umgesetzt werden, indem der Getriebeaufwand deutlich reduziert wurde (formschlüssige Schaltelemente, reduzierte Gangzahl etc.), die E-Maschine intelligent und

effizient für Getriebefunktionalitäten genutzt wird und eine bessere VKM-Ausnutzung gegenüber 2-EM-Konzepten durch feste Gänge erreicht wird.

Die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Innovationen für einen Plug-In-Hybriden tragen einerseits zur effizienten und damit ressourcenschonenden Individualmobilität bei und sichern andererseits die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilwirtschaft, da aufgezeigt werden konnte, dass hohe Leistung/Performance und hoher Fahrkomfort bei gleichzeitig hoher Effizienz kombinierbar sind und keine gegensätzlichen Zielkonflikte darstellen müssen. Diese Ergebnisse haben vor allem großen Wert für das wichtige Premiumsegment der deutschen Automobilwirtschaft. Insgesamt kann die Attraktivität von Plug-In-Hybriden vor Kunde erhöht werden, wodurch eine höhere Marktdurchdringung erfolgen kann und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Automobilssektor gesenkt werden können.