

e-generation

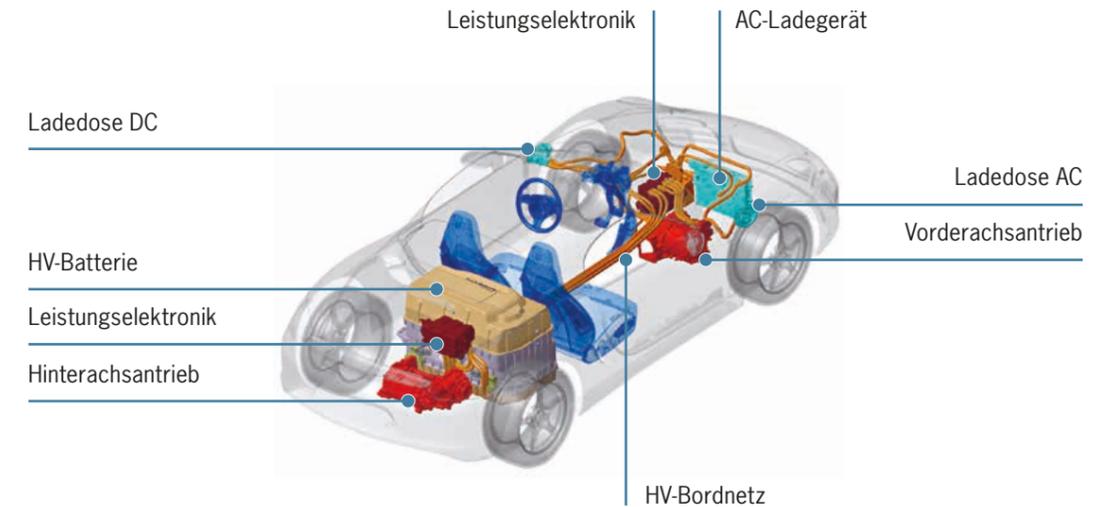
Ein Forschungsprojekt mit positiver Bilanz

Ein Forschungskonsortium entwickelte unter der Leitung von Porsche neue Komponenten für Elektrofahrzeuge und erprobte sie in drei Elektrosportwagen auf Basis des Porsche Boxster. Im Frühjahr 2015 endete das von der Bundesregierung geförderte Projekt *e-generation*, an dem Porsche Engineering maßgeblich beteiligt war. Bezüglich der Reichweite, Kostenreduzierung und Alltagstauglichkeit für Elektrofahrzeuge wurden erhebliche Fortschritte erzielt.

Von Stefan Bender, Dr. Hartmut Chodura, Manuel Groß, Thorsten Kühn und Volker Watteroth



Forschungsfahrzeug aus dem Projekt e-generation



Überblick der Hochvolt-Komponenten im Fahrzeug

Bereits 2010 entstanden unter Leitung von Porsche Engineering drei elektrisch angetriebene Porsche Boxster-Forschungsfahrzeuge. Mit ihnen wurden über 70 000 Kilometer zurückgelegt und mehrere Hundert kundennahe Testfahrten ausgewertet. Das Fahrzeugkonzept war ein Erfolg. Fahrverhalten und Zuverlässigkeit wurden positiv bewertet, Einschränkungen ergaben sich – erwartungsgemäß – hauptsächlich bei Reichweite und Fahrzeuggewicht.

Anschließend startete im April 2012 das dreijährige Projekt *e-generation* mit 13 Partnern aus Forschung und Industrie. Es wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und endete planmäßig im Frühjahr 2015. Die Hauptziele waren:

- > Senkung des elektrischen Energiebedarfs (Schwerpunkt: Antrieb und Klimatisierung),
- > Reduktion des Fahrzeuggewichts,
- > Kostensenkung der Antriebskomponenten,
- > Komfort und Alltagstauglichkeit wie bei einem Serien-Porsche.

Als Versuchsträger dienten drei im Entwicklungszentrum Weissach neu aufgebaute Prototypen. Die Fahrzeuge erhielten Ende 2013 die notwendigen Freigaben und werden seitdem auch im öffentlichen Straßenverkehr erprobt.

Antriebskonzept mit zwei Elektromotoren und Allradantrieb

In der Konzeptphase wurden zahlreiche Antriebsmodelle untersucht und mithilfe von Simulationen bewertet. Oberste Prämisse war dabei, eine Konfiguration zu finden, die den Projektzielen genügt und gleichzeitig Fahreigenschaften ermöglicht, die von Porsche-Sportwagen erwartet werden. Darüber hinaus mussten der vorhandene Bauraum und die Gegebenheiten des Fahrwerks berücksichtigt werden. Unter diesen Voraussetzungen kristallisierte sich ein Antriebskonzept heraus, bei dem je eine quer eingebaute E-Maschine Vorder- und Hinterachse antreibt.

Unter Leitung der Robert Bosch GmbH wurden zwei neue E-Maschinen entwi-

ckelt, die sich durch verbesserte Wirkungsgrade auszeichnen. Zum einen legte dafür die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen eine permanent erregte Synchronmaschine (PSM) aus, zum anderen entstand unter Mitarbeit der TU Braunschweig eine Asynchronmaschine (ASM). Für beide Maschinen übernahm >



Die Förderpartner

Bosch anschließend den Aufbau und die betriebsbereite Fertigstellung.

Die PSM treibt die Vorderachse an, die ASM befindet sich im Heck unter dem hinteren Kofferraum. Die Steuerung der Motoren übernehmen zwei Leistungselektroniken von Bosch. Das Antriebsmanagement basiert auf der Software von Bosch, von Porsche stammen Applikation und Parametrierung. An der Vorderachse stehen bis zu 120 kW zur Verfügung, der Hinterachsmotor leistet maximal 140 kW. Damit kann das Fahrzeug in 5,2 Sekunden von null auf 100 km/h beschleunigt werden. Der Fahrer kann zudem zwischen den Fahrprogrammen Normal, Sport und Range wählen. Im Range-Modus übernimmt hauptsächlich

die effizientere PSM an der Vorderachse den Antrieb. Im Sport-Modus werden immer beide Achsen angetrieben, was Porsche-typische Fahreigenschaften ermöglicht.

Energieversorgung durch neu entwickelte Hochvoltbatterie

Die Hochvoltbatterie (HV-Batterie) im 400-Volt-Bereich wurde von Porsche Engineering ausgelegt und entwickelt. Durch konsequenten Leichtbau und moderne Zelltechnologien stehen rund 35 kWh Energie zur Verfügung, 20 Prozent mehr als im Prototyp von 2010. Die abrufbare elektrische Leistung liegt kurzzeitig bei rund 270 kW.



Die Hochvoltbatterie des Forschungsprojekts wurde von Porsche Engineering ausgelegt und entwickelt.

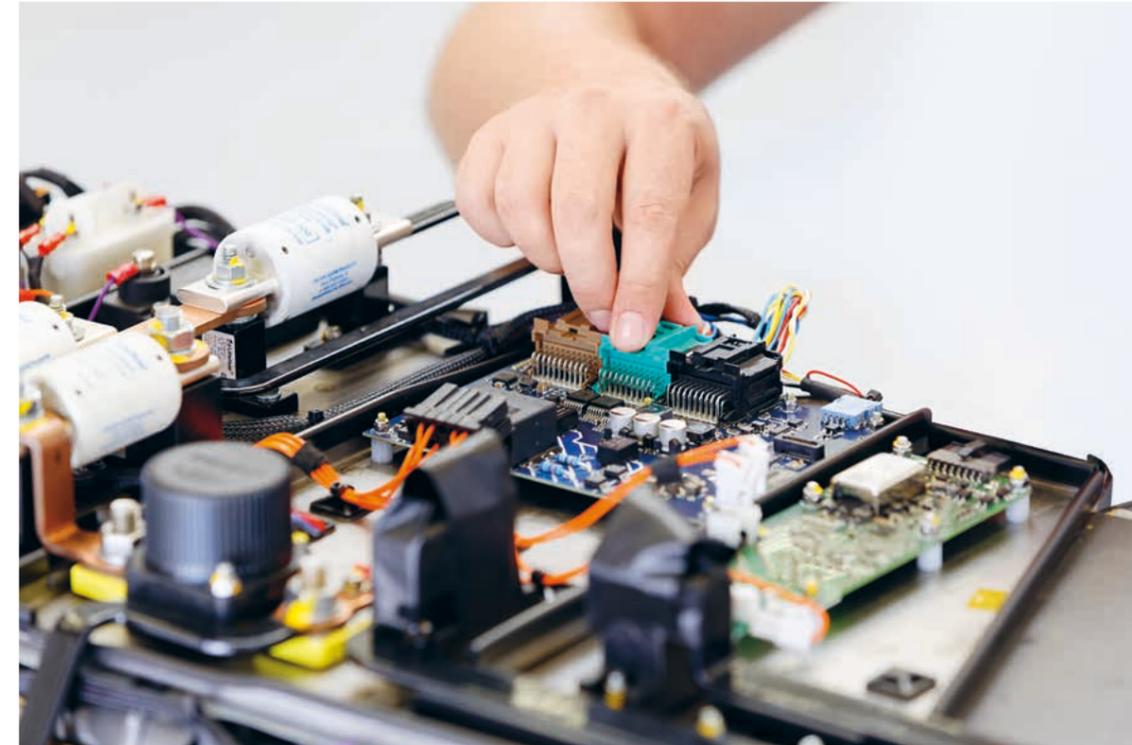
Die Batterie wird flüssiggekühlt und kann über PTC-Folien beheizt werden. Für die Kühlung entstand ein neues Konzept, das auf die bisher üblichen, relativ schweren Metallplatten verzichtet. Stattdessen wurden Kühlelemente entwickelt, die direkt an den Zellpolen angebracht sind. Dadurch konnten das Gewicht gesenkt und der Wärmetransport verbessert werden.

Zum Laden der Batterie verfügen die Prototypen über mehrere Anschlüsse. Das eingebaute Ladegerät liefert abhängig vom Stromanschluss bis zu 22 kW elektrischer Leistung. Damit kann eine leere Batterie in rund anderthalb Stunden geladen werden. An Schnellladestationen erreicht die Batterie in weniger als 20 Minuten 80 Prozent ihrer Kapazität.

Die Batterieentwicklung im Forschungsprojekt ist eine Weiterentwicklung der Komponente des Vorgängerfahrzeugs von 2010. Das Prinzip beruht auf folgendem Aufbau:

- > zwei Zellmodulebenen mit jeweils fünf Zellmodulen,
- > ringförmiger Tragrahmen als zentrales Strukturelement,
- > zwei Gehäusedeckel in faserverstärkter Leichtbauweise,
- > batterieinterne Aufteilung der Traktionspfade in jeweils einen Anschluss vorne und hinten.

Der grundlegende Unterschied zum Konzept von 2010 ist die Eigenentwicklung der Zellmodule unter Verwendung von Pouch-Zellen der Firma LG Chemicals. In der Modulentwicklung stecken zahlreiche Innovationen: Die autarken Module mit integrierter Kühlung/Heizung, Batterie-Management-System (BMS) und modularem Aufbau auf minimalem Bauraum ergeben ein kompaktes Package. Die Verbindung von Zell-Terminal- und Flächenkühlung führt zu einer hocheffizienten Modulkühlung



Das Batterie-Management-System (BMS) für Spannungslagen bis 800 Volt kann in verschiedenen Antriebssystemen optimal appliziert werden.

für performanceorientierte Anwendungen. Auch mit dem erstmaligen Einsatz einer PTC-Heizfolie für effiziente Erwärmung direkt an der Zelle betreten die Entwickler Neuland. Das Batterie-Management-System schließlich ist eine komplette Eigenentwicklung von Porsche Engineering für Spannungslagen bis 800 Volt und kann optimal in verschiedene Antriebssysteme appliziert werden.

In den drei Jahren der Projektlaufzeit entwickelten die Ingenieure den kompletten Hochvolt-Energiespeicher und bauten drei Prototypenbatterien auf. Jedes Batteriemodul verfügt über einen bei Porsche Engineering entwickelten Zellcontroller. Er überwacht alle Zellspannungen und Temperaturen des Moduls. Die Daten gehen an das zentrale Steuergerät der Batterie. Dort erfolgen die Auswertung sowie die Überwachung der elektrischen Isolation. Über

den CAN-Bus können auch andere Komponenten diese Daten empfangen.

Die Verteilung des Kühlmediums in der Batterie erfolgt durch eine Parallelschaltung der Modulkühler mit je einem Kühlmittelverteiler pro Modulebene. Die Kühlmittelanschlüsse am Modulkühler und die Kühlmittelverteiler bestehen aus Standardbauteilen der Norma Group. Dadurch werden Dichtigkeit und Qualität gewährleistet. Zudem verfügt die Batterie über zwei leckagefreie Schnelltrennkupplungen der Firma Stäubli, die den schnellen und unkomplizierten Ein- und Ausbau der Traktionsbatterie einschließlich Rahmen ermöglichen.

Ein glasfaserverstärkter Deckel schützt die Batterie vor Spritzwasser von oben, eine Gore-Membrane gewährleistet den Druckausgleich. Die lückenlose elektrische Schirmung für gute elektro-

magnetische Verträglichkeit (EMV) übernimmt ein Überzug aus metallisiertem Lack auf den beiden Kunststoffdeckeln oben und unten.

Die technischen Daten und besondere Kennzahlen der Batterie sind auf der folgenden Seite zusammengefasst.

Crashsichere Lagerung der Batterie im Hinterwagen

Das Batteriepaket fand crashsicher Platz im Hinterwagen des Boxsters. Für die Sicherheit ist vor allem der ringförmige Tragrahmen aus hochfestem Aluminium verantwortlich. Durch dessen strukturoptimierte Auslegung können alle Eigenlasten sowie die Crashlasten für Beschleunigungen bis zu 60 g abgefangen werden. Der Tragrahmen überträgt praktisch das Heckcrashkonzept vom Serien-Boxster mit Verbrennungsmotor >

Technische Daten

Zellhersteller	LG Chem
Zelltyp	Pouch P2.6 (PHEV)
Zellchemie	NMC
Kapazität	25,9 Ah
Nennspannung	3,7 V
Verschaltung	100S4P, 10 Zellmodule
Energiegehalt	38,3 kWh nominal, 35,8 kWh nutzbar
Leistung	270 kW (420 V, 650 A)
Spannung	370 V nominal, 410 V maximal
Reichweite	> 200 km
Batteriekühlung	Terminal- und Flächenkühlung mit Wasser/Glykol

Kennzahlen der HV-Batterie

Zellanteil am Gesamtvolumen	31 % (84 l von 271 l)
Modulanteil am Gesamtvolumen	61 % (166 l von 271 l)
Zellanteil an der Gesamtmasse	64 % (230 kg von 362 kg)
Modulanteil an der Gesamtmasse	81 % (295 kg von 362 kg)
Strukturanteil an der Gesamtmasse	15 % (54 kg von 362 kg)
Leistungsdichte pro Kilogramm	754 W/kg
Energiemenge pro Kilogramm	106 Wh/kg

auf das Elektrofahrzeug. Die beiden Zellmodulebenen sind fest am Tragrahmen angebunden, die obere direkt, die untere indirekt über einen glasfaserverstärkten Kunststoffdeckel.

Um die rund 360 Kilogramm schwere Batterie im Fahrzeug unterzubringen, bedurfte es einiger Änderungen im Karosserierohbau. Diese betreffen zum einen den Hinterwagen, an dem die Batterie befestigt wird, und zum anderen den Vorderwagen, um Raum für den Vorderachsantrieb zu schaffen. Auf Produktionsstraßen, die für die Serienfertigung ausgelegt sind, wurden Sonderteile verbaut, wie etwa ein von Porsche Engineering entwickelter Hybrid-Querträger aus faserverstärktem Kunststoff (siehe Porsche Engineering Magazin 1/2015).

Thermomanagement reduziert Stromverbrauch

Batterien funktionieren am besten bei klimatischen Bedingungen, unter denen sich auch der Mensch wohlfühlt. Bei zu niedrigen oder zu hohen Temperaturen leidet die Lebensdauer der Energiespeicher, zusätzlich sinkt bei tiefen Temperaturen die zur Verfügung stehende Leistung. Deshalb muss die Batterie gegebenenfalls gekühlt oder beheizt werden. Die dafür notwendige Energie kommt aus der Batterie selbst, was jedoch die Reichweite reduziert.

Bei niedrigen Außentemperaturen wird die Batterie während des Ladens mit einem Teil des zugeführten Stroms beheizt. Das spart Energie aus der Batterie und sorgt dafür, dass dem Antrieb bereits zu Fahrtbeginn die maximale Leistung zur Verfügung steht. Da der Wirkungsgrad der Batterie bei rund 95 Prozent liegt, bleibt die Selbsterwärmung bei hohen Leistungsabforderungen mit unter fünf Kilowatt relativ gering. Erst bei Außentemperaturen von

über 30 Grad wird ein Klimakreislauf benötigt, der die Batterie über einen Kälteprozess unter die Umgebungstemperatur abkühlen kann.

Da Elektromotoren und HV-Batterien einen hohen Wirkungsgrad haben, erzeugen sie im Vergleich zu einem Verbrennungsfahrzeug relativ wenig Abwärme. Möchte man den Fahrgastraum des Fahrzeuges aber heizen, muss die Energie aus der HV-Batterie verwendet werden. Dies reduziert natürlich die Reichweite des Fahrzeugs.

Unter Leitung der Firma Mahle Behr wurde im Projekt *e-generation* eine thermoelektrische Wärmepumpe entwickelt, mit der man schon geringe Abwärme auf ein Temperaturniveau heben kann, das zum Heizen des Innenraums geeignet ist. Die besten Wirkungsgrade hat diese Wärmepumpe bei Umgebungstemperaturen zwischen zehn und 15 Grad, also wie sie in Mitteleuropa üblich sind. Hier liegt die sogenannte Leistungszahl (Coefficient of Performance) bei zwei. Das bedeutet,

dass der Energiebedarf aus der Hochvoltbatterie auf 50 Prozent gesenkt werden kann.

Erprobung bestätigt Alltagstauglichkeit

In der ersten Erprobungsphase absolvierte der Prototyp einige Tausend Testkilometer bei ständigen Verbesserungen und Optimierungen. Für die Straßenfreigabe wurde das Fahrzeug dabei auf dem Testgelände in Weissach auf Funktion und Standfestigkeit geprüft. Die Optimierung von Antrieb und Fahrwerk fand vorwiegend im Porsche Testzentrum in Nardò (Süditalien) statt. In den winterlichen Alpen überzeugten die Prototypen ebenfalls: Der vollelektrische Boxster ist auch nach einer Nacht mit minus 25 Grad Außentemperatur fahrbereit.

Zur Optimierung der Alltagstauglichkeit entstanden im Laufe des Projektes verschiedene Assistenzsysteme. In Zusammenarbeit mit dem Karlsruher

Institut für Technologie (KIT) wurde eine Längsführung umgesetzt, die aus prädiktiven Streckendaten eine möglichst effiziente Geschwindigkeitsplanung für den vorausliegenden Weg berechnet. Das System lässt das Fahrzeug nicht nur souverän im Verkehr mitschwimmen, sondern ermöglicht es auch, auf freier Landstraße sicher und dynamisch durch die Kurven zu fahren. Gemeinsam mit der RWTH und dem KIT wurde zudem ein Ausrollassistent entwickelt, der dem Fahrer vor Kurven oder Geschwindigkeitswechseln zum optimalen Zeitpunkt einen Hinweis gibt, den Fuß vom Fahrpedal zu nehmen.

Ausblick

Auf *e-generation* folgt *e-revolution*: Gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung treibt Porsche die Entwicklung des Elektrofahrzeugs im dritten Projekt in Folge weiter voran. *e-revolution* zielt auf die weitere Steigerung von Reichweite, Alltagstauglichkeit und Performance ab. ■



Zwei Porsche Boxster aus dem Forschungsprojekt *e-generation* bei einer winterlichen Erprobungsfahrt in den Alpen.