

# Porsche Engineering

## MAGAZIN

**KUNDEN & MÄRKTE** Rekordfahrten auf der Ringstrecke von Nardò  
**PORSCHE HAUTNAH** Batterieentwicklung für den Porsche 919 Hybrid  
**ENGINEERING INSIGHTS** Hochvolttesting von der Zelle bis zur Batterie

[www.porsche-engineering.de](http://www.porsche-engineering.de)

MACAN-MODELLE: Kraftstoffverbrauch (kombiniert) 9,2 – 6,1 l/100 km; CO<sub>2</sub>-Emission (kombiniert) 216 – 159 g/km; Effizienzklassen: E–B



## INTELLIGENTES THERMOMANAGEMENT

*Einblick in neue Lösungen*



**Schön anzusehen,  
wenn sich Ideen auf den Weg machen.**

**Porsche Engineering**  
driving technologies



**PORSCHE**



Malte Radmann und Dirk Lappe,  
Geschäftsführer von Porsche Engineering

## Über Porsche Engineering

Zukunftsweisende Lösungen sind der Anspruch, den Ferdinand Porsche bereits im Jahr 1931 mit der Gründung seines Konstruktionsbüros verfolgt hat. Er legte damit den Grundstein für die heutige Porsche-Kundenentwicklung. Dem fühlen wir uns mit jedem Projekt, welches wir für unsere Kunden durchführen, verpflichtet.

Das Leistungsspektrum von Porsche Engineering reicht von der Konzeption einzelner Komponenten bis hin zur Planung und Durchführung von Gesamtfahrzeugentwicklungen und wird über den Automobilbereich hinaus auch in andere Branchen übertragen.

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

\_\_\_\_\_ wir begrüßen Sie an dieser Stelle mit einem freundlichen „Ni hao“. In diesen Tagen wird unser neuer Standort in Shanghai eröffnet. Seit über 20 Jahren widmen wir uns bereits den spezifischen Bedürfnissen unserer chinesischen Kunden, die Gründung einer Tochtergesellschaft ist für uns somit die logische Konsequenz unseres jahrzehntelangen Engagements vor Ort – ein traditionsreicher Schritt in die Zukunft, ganz so, wie man uns kennt.

Mit dem Fokus dieser Ausgabe – Thermomanagement – verhält es sich ähnlich: ein traditionelles Thema im Rahmen der Fahrzeugentwicklung, das jedoch mit Blick auf zukunftsweisende Mobilität und alternative Antriebe immer vielseitiger und komplexer wird. Ein Grund für uns, in diese Materie tiefer einzusteigen und unter dem Anspruch eines zukunftstauglichen und „intelligenten Thermomanagements“ den Bogen über die Funktionsentwicklung hinweg bis zur Batterietemperierung zu spannen.

Ein besonderes Highlight war für Porsche in diesem Jahr die Rückkehr nach Le Mans. Die Fahrzeugentwicklung des 919 Hybrid und schließlich das spektakuläre Rennen selbst haben dieses Jahr stark geprägt. Im Artikel „Le Mans“ lassen wir das Ereignis noch einmal Revue passieren und berichten darüber hinaus über die besonderen Herausforderungen, die es im Rahmen der Batterieentwicklung für den 919 Hybrid zu meistern galt.

Aus vergangenen Magazinausgaben wissen Sie ja bereits um die Besonderheiten unseres Prüf- und Testgeländes in Nardò. Begeben Sie sich diesmal mit uns gemeinsam auf die Ringstrecke: im Beitrag „Nardò – ein idealer Boden für Rekorde“ lassen wir die spannendsten Rekordfahrten aus den vergangenen Jahren noch einmal aufleben.

Wir wünschen viel Spaß beim Lesen dieser Ausgabe des Porsche Engineering Magazins!

Ihr Malte Radmann und Ihr Dirk Lappe

# 26 KUNDEN & MÄRKTE

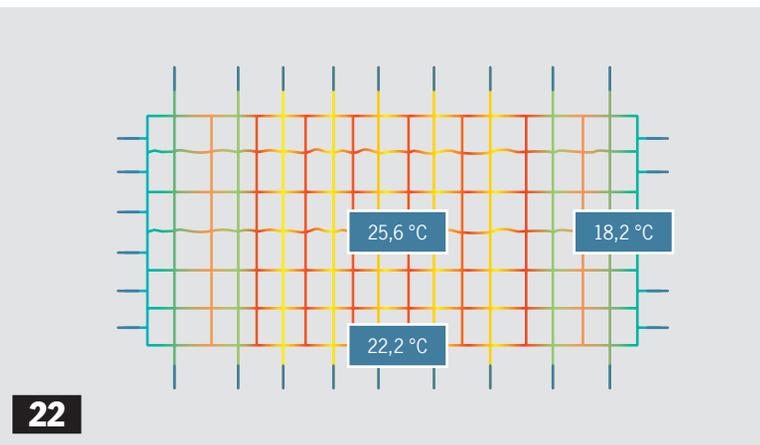
## REKORDE IN NARDÒ

*In Nardò wird Geschichte geschrieben. Immer wieder aufs Neue. Wir haben die spannendsten Rekordfahrten der vergangenen Jahre zusammengefasst.*

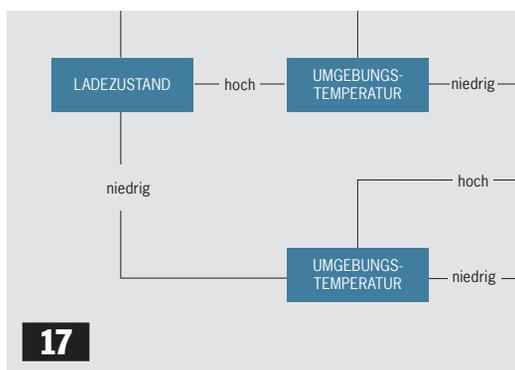




12



22



17



32



38

## INTELLIGENTES THERMOMANAGEMENT

- 12 Effizientes Zusammenspiel**  
Ganzheitliches Thermomanagement für zukünftige Anforderungen
- 17 Intelligente Funktionen**  
Funktionsentwicklung für Kühlsysteme
- 22 Optimale Batterietemperierung**  
Neue Lösungen für Funktionalität und Reichweite

## KUNDEN & MÄRKTE

- 26 Nardò**  
Idealer Boden für Rekorde

## PORSCHE HAUTNAH

- 32 Le Mans**  
Die Rückkehr von Porsche auf die Rennstrecke
- 36 919 Hybrid**  
Die Batterieentwicklung für Le Mans

## ENGINEERING INSIGHTS

- 38 Unter Spannung**  
Testing von der Zelle bis zur Batterie

- 
- 03** Editorial
  - 06** News
  - 44** Impressum
- 

**MACAN-MODELLE:** Kraftstoffverbrauch (kombiniert) 9,2–6,1 l/100 km; CO<sub>2</sub>-Emission (kombiniert) 216–159 g/km; Effizienzklassen: E–B

---

## 保时捷工程技术研发公司在华成立子公司

---

保时捷工程 (Porsche Engineering) 通过建立中国子公司进一步拓展亚洲市场: 保时捷工程技术研发 (上海) 有限公司 (Porsche Engineering Shanghai Co., Ltd) 将于新旧年交替之际正式挂牌成立。

继捷克布拉格和意大利纳尔多之后, 上海将成为保时捷工程在德国之外的第三个基地。随着各个子公司与总公司的专业一体化的保证, 客户可享受引领未来的汽车领域高端服务。在上海, 保时捷工程的工程师们将继续致力于发挥整车研发和系统研发方面的核心实力。

保时捷工程投身于中国市场已有20逾年的历史。为中国客户提供研发是保时捷工程的传统业务。“我们在中国的客户特别重视一体化的项目团队, 以实现最优化的合作”, 首席执行官雷德民 (Malte Radmann) 说道, “上海子公司可助我们在未来更全面满足客户这一需求。”

与同济大学合作是保时捷工程在中国的重要战略之一。双方已于今年6月签署合作协议, 计划在培训、研究及工程技术领域携手展开广泛的合作。以布拉格分公司与布拉格理工大学成功的合作模式为典范, 双方将在科学、研究、教学、试验台架和实践方面密切交流。



---

## PORSCHE ENGINEERING GRÜNDET TOCHTERGESELLSCHAFT IN CHINA

---

# News

— Mit der Gründung einer eigenen Tochtergesellschaft erweitert Porsche Engineering das traditionell starke Engagement in Asien: Zum Jahreswechsel öffnet die Porsche Engineering (Shanghai) Co., Ltd. in China.

Shanghai wird somit neben Prag und Nardò der dritte Standort außerhalb Deutschlands. Durch die fachliche Integration der Standorte wird sichergestellt, dass die Kunden stets ganzheitliche Premiumdienstleistungen für zukunftsweisende Mobilität erhalten. Die Porsche-Ingenieure werden sich in Shanghai auf die bewährten Kernkompetenzen Gesamtfahrzeugentwicklung und Systementwicklung konzentrieren.

Die Entwicklung für chinesische Kunden hat bei Porsche Tradition. Seit über zwanzig Jahren ist die Porsche-Kundenentwicklung bereits in China aktiv. „Unsere Kunden in China legen besonderen Wert auf integrierte Projektteams für eine optimale Zusammenarbeit“, sagt Geschäftsführer Malte Radmann, „mit unserem neuen Standort in Shanghai können wir diese Anforderung künftig noch besser erfüllen.“

Wichtiger Bestandteil des Engagements in China ist auch die Zusammenarbeit mit der Tongji-Universität in Shanghai. Bereits im Juni dieses Jahres wurde ein Kooperationsvertrag unterzeichnet, der eine umfangreiche Zusammenarbeit vorsieht. Nach dem Vorbild der erfolgreichen Kooperation zwischen dem Standort Prag und der dortigen Technischen Universität wird es auch in Shanghai zu einem engen Austausch in Bezug auf Wissenschaft, Forschung, Lehre, Prüfeinrichtungen und Praxiserfahrungen kommen. ■



---

## ENTWICKLUNGSZENTRUM WEITER AUSGEBAUT



## GREENTEC AWARDS VERLIEHEN



## WORK-LIFE-BALANCE BEI PORSCHE ENGINEERING



---

\_\_\_ Mit der Inbetriebnahme des neuen Design-Studios mit Konzeptbau, des aero-akustischen Windkanals sowie des Elektronik-Integrationszentrums wurde am 18. Juli 2014 ein wichtiger Abschnitt im Rahmen des Ausbaus des Entwicklungszentrums Weissach abgeschlossen. Bis 2016 entsteht noch ein neues Antriebsprüfgebäude mit 18 Prüfständen zur Entwicklung neuer Hybridantriebe sowie neuer Verbrennungs- und Elektromotoren. Auch die Kundenentwicklung wird von diesen neuen hochtechnologischen Anlagen profitieren. Porsche baut mit diesen Investitionen seine Kernkompetenzen weiter aus und schafft neue Ressourcen nicht nur für die Eigenentwicklung – durch die symbiotische Verbindung der Sportwagen-Serienentwicklung und der Kundenentwicklung stehen diese Ressourcen auch für externe Projekte zur Verfügung. ■

\_\_\_ Bei der diesjährigen Verleihung der GreenTec Awards – Europas größtem Umwelt- und Wirtschaftspreis – hielt Malte Radmann, Geschäftsführer der Porsche Engineering Group GmbH, die Laudatio bei der Preisübergabe in der Kategorie Automobilität. Gewinner war hier das Projekt RUBIN, eine Kooperation zwischen dem Reifenhersteller Continental und dem Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie. Ziel des Projektes ist es, Russischen Löwenzahn in Naturkautschukertrag und Anbaufähigkeit für die industrielle Verwertung weiterzuentwickeln. Mit dem Preis werden seit 2008 jährlich besonderes Umweltengagement und grüne Umwelttechnologien ausgezeichnet. In diesem Jahr fand die Verleihung erstmalig in Kooperation mit der Messe München als Auftaktveranstaltung für die weltgrößte Umwelttechnikmesse IFAT statt. ■

\_\_\_ Der Erfolg eines jeden Unternehmens basiert auf motivierten und leistungsfähigen Mitarbeitern. Eine ausgewogene Work-Life-Balance bildet hierfür eine wichtige Grundlage. Porsche Engineering bietet in diesem Rahmen flexible, individuelle Arbeitszeitmodelle, um Familie, Freizeit und Beruf erfolgreich vereinen zu können. Nicht nur fest angestellte Mitarbeiter profitieren davon, auch Studenten erhalten bestmögliche Unterstützung. Aktuelles Beispiel hierfür ist der Leistungssportler Jonathan Scholz, Handballspieler beim Erstligisten SG BBM Bietigheim. Der Maschinenbaustudent ist seit Anfang September bei Porsche Engineering im Bereich Motorenkonstruktion als Praktikant tätig. Dank eines flexiblen Arbeitszeitmodells wird es ihm ermöglicht, neben den regelmäßigen sportlichen Aktivitäten, die der Leistungssport erfordert, auch wichtige Praxiserfahrungen für sein Studium zu sammeln. ■

## PREISE FÜR IMAGEFILM „DRIVING TECHNOLOGIES“



\_\_\_ Der neue Porsche Engineering-Unternehmensfilm „Driving Technologies“ wurde mit zwei internationalen Filmpreisen ausgezeichnet: Er erhielt bei den Communicator Awards in New York eine Gold-Auszeichnung und bei den Internationalen Wirtschaftsfilmtagen in Wien eine silberne Victoria. Der Film beschreibt das Unternehmen als innovativen Entwicklungsdienstleister für zukunftsweisende Mobilität. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den Mitarbeitern und deren Ingenieurskompetenz. Die für Unternehmensvideos bislang nicht gesehene Trailerhaftigkeit macht den Film besonders. ■

### WEBLINKS

[www.porsche-engineering.de](http://www.porsche-engineering.de)  
[www.youtube.com/  
watch?v=nJL9v8KXmmo](https://www.youtube.com/watch?v=nJL9v8KXmmo)

## PORSCHE STÄRKT ENGAGEMENT IN NARDÒ



\_\_\_ Bei einem Besuch des Präsidenten der süditalienischen Region Apulien, Nichi Vendola, sowie der Vizepräsidentin Angela Barbanente in Stuttgart-Zuffenhausen haben Porsche und die Regierungsspitze die partnerschaftliche Zusammenarbeit zur strategischen Entwicklung des Nardò Technical Centers und der Region Apulien gemeinsam bestärkt. „Das Nardò Technical Center mit seinen umfangreichen Erprobungsmöglichkeiten ist zu einem wichtigen Bestandteil der ganzheitlichen Porsche-Ingenieurdienstleistungen und des Porsche-Konzerns geworden“, erläuterte Matthias Müller, Vorstandsvorsitzender der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. Porsche plant umfangreiche Investitionen in das Test- und Prüfgelände. Nichi Vendola betonte, dass Porsche und das Nardò Technical Center für die Region wichtige Partner seien: „Durch Porsche werden wir auch in Zukunft die Entwicklung der Region in Bezug auf Wirtschaftskraft, Arbeitsplätze und Infrastruktur positiv gestalten.“ ■



-30°

-20°

-10°

# INTELLIGENTES Thermo- management

0°

10°

20°

30°

\_\_\_ Durch Thermomanagement wird ein optimaler Temperaturhaushalt im Fahrzeug gewährleistet. Daraus ergibt sich ein umfangreiches Aufgaben- und Einsatzfeld, das intelligenter Lösungen bedarf. Hierbei ist Thermomanagement weitaus mehr, als dass der Fahrer einen kühlen Kopf behält. Ziel ist es zum Beispiel, Wärmeströme so zu leiten, dass der Kraftstoffverbrauch reduziert und der Innenraumkomfort erhöht wird. Eine essenzielle Herausforderung, um Mobilität zukunftsfähig zu gestalten.

Innerhalb dieses breiten Themenfeldes existieren Teilbereiche – so beschreiben wir im Folgenden das effiziente Zusammenspiel von Bauteilschutz, Komfort und Emissionsreduktion. Zudem werden zwei weitere spannende Facetten aufgegriffen – Funktionsentwicklung und Batterietemperierung. Erfahren Sie mehr darüber.

# Effizientes Zusammenspiel

— Mit der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges ergeben sich neue Fragestellungen in vielen Bereichen der Fahrzeugentwicklung. Nachdem die Bedeutung des Thermomanagements im Bereich elektrischer Maschinen in der letzten Ausgabe schon angedeutet wurde, betrachten wir dieses interessante Thema nun genauer.

*Text: Björn Pelmert  
Fotos: Jörg Eberl*



*Essenziell im Rahmen einer jeden Fahrzeugentwicklung: das Testing im Klima-Windkanal*



**MACAN-MODELLE:** Kraftstoffverbrauch (kombiniert) 9,2–6,1 l/100 km; CO<sub>2</sub>-Emission (kombiniert) 216–159 g/km; Effizienzklassen: E–B

*Im Klimawindkanal werden Extrembedingungen simuliert.*

## Thermomanagement

Der Bereich Thermomanagement entwickelte sich ursprünglich aus der Notwendigkeit des *Bauteilschutzes*, insbesondere des Schutzes von Motor, Getriebe und allen sonstigen im Motorraum befindlichen Teilen. *Komfortverbesserung* und *Emissionsreduktion* sind neu hinzugekommene, zunehmend wichtige Bausteine des modernen Thermomanagements, welches sich somit aus drei Teilgebieten zusammensetzt. Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche im Detail diskutiert.

bestimmten Abwärmeleistung reicht ein Kühlmittelkühler hierfür jedoch nicht mehr aus und es müssen weitere Kühler eingesetzt werden. Mehrere Tausend Liter Luft pro Sekunde sind notwendig, um solch hohe Leistungen über Kühler an die Umgebung abzugeben. Ein großer Teil der gesamten Motorabwärme fließt jedoch nicht ins Kühlwasser, sondern wird konvektiv an die Umgebungsluft abgeführt.

Die hiermit verbundene potenzielle Aufheizung des Motorraumes begründet einen weiteren Schwerpunkt des Bau-

teilschutzes, den Hitzeschutz. Mit dem Aufheizen des Motorraumes können Bauteile wie Motorsteuergeräte, Zündspulen oder Stecker ihre jeweilige Grenztemperatur überschreiten. Reflektoren, Luftspalte und aktive Belüftung aus dem Unterboden oder der Motorhaube werden eingesetzt, um diesen hohen Temperaturen entgegenzuwirken.

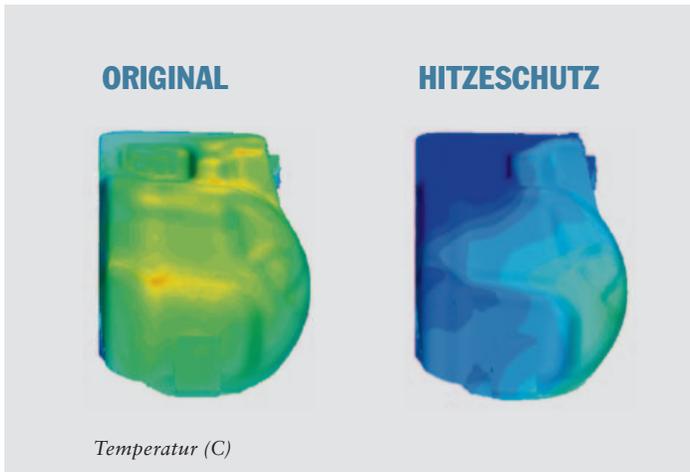
Auch wenn kein Überschreiten der Grenztemperatur vorliegt, kann eine Temperaturabsenkung sinnvoll sein, zum Beispiel um Bauteile effizienter betreiben zu können: >

## Bauteilschutz

Der Bauteilschutz beschäftigt sich mit der Einhaltung von Bauteilgrenztemperaturen, ein Merkmal, welches nahezu jedes Bauteil im Fahrzeug hat. Ein Beispiel ist der Motor, der unter keinen Umständen in Temperaturbereichen betrieben werden darf, in denen Kavitation (Bildung und Auflösung von dampfgefüllten Hohlräumen in Flüssigkeiten), Klopfen oder thermomechanische Spannungen zu Schädigungen oder gar zum Ausfall führen können. Dies kann bedeuten, Wärmeströme von über 100 kW abführen zu müssen. Ab einer



*Vorbereitung eines Kühlers am Prüfstand*



Darstellung der simulierten Temperaturreduktion am Generator durch gezielte Hitzeschutzmaßnahmen

In der Abbildung oben ist das Ergebnis einer Hitzeschutzmaßnahme für einen Generator zu sehen. Durch ein Zweikomponenten-Hitzeschutzblech konnte der Wärmeeintrag vom Abgassystem auf den Generator deutlich reduziert werden. Die Generator Temperatur sank deutlich, wodurch die Effizienz von 70 Prozent auf 90 Prozent erhöht wurde. Da der thermisch geschützte Generator nun deutlich leistungsfähiger war, konnte er durch eine kleinere, leichtere und billigere Maschine ersetzt werden.

Die Gewährleistung des Bauteilschutzes ist innerhalb der Serienentwicklung konventioneller Fahrzeuge bereits gut etabliert. Ein Gebiet mit neuen Fragestellungen und speziellen Anforderungen stellt das Thermomanagement (hybrid-)elektrischer Fahrzeuge dar.

Um dem Bauteilschutz auch in alternativen Antriebskonzepten gerecht zu werden, finden neuartige Wärmeleitmaterialien und Kühlkonzepte Anwendung. Graphit, Heat Pipe oder Vaporchamber sind Lösungsansätze, die momentan entwickelt werden, um Hybrid-Komponenten bestmöglich zu nutzen und vor Überhitzung oder Unterkühlung zu schützen. Insbesondere die optimale Temperierung der Batterie hat sich als sehr komplex herausgestellt, da unter-

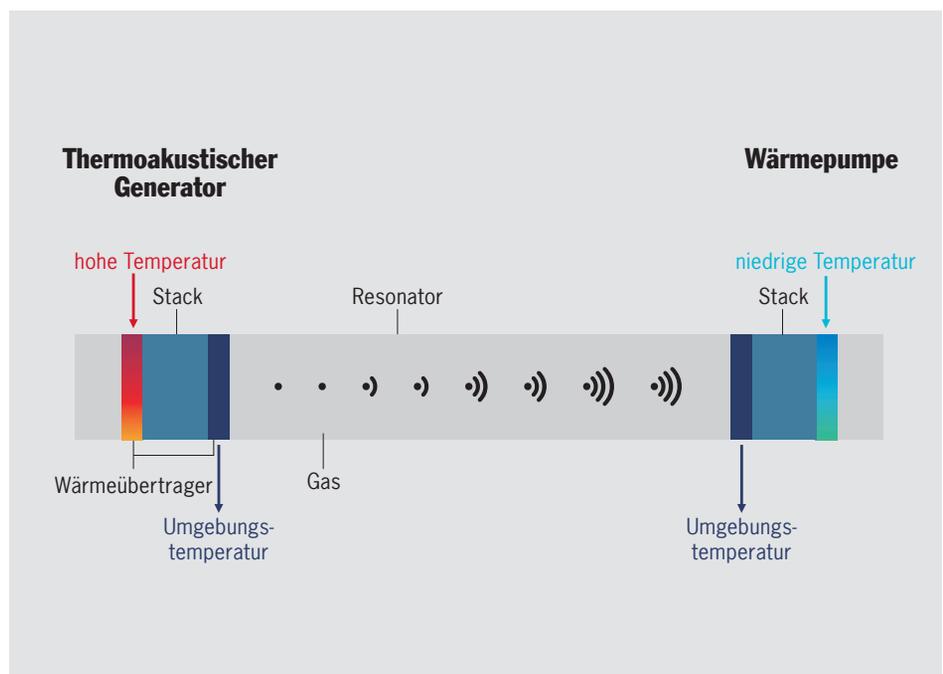
schiedlichste Leistungsanforderungen und Zelltypen jeweils verschiedene Herangehensweisen erfordern. Beispielhaft gewährt der Artikel „Optimale Batterietemperierung“ (ab Seite 22) einen tieferen Einblick in die Auslegung solcher Systeme.

### Komfort – warme Füße, kühler Kopf

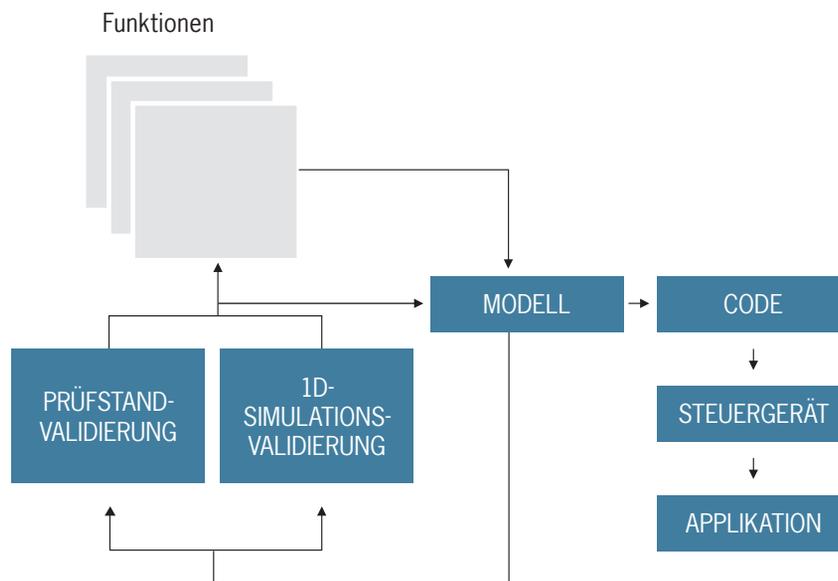
Das zweite große Teilgebiet des Thermomanagements stellt die Verbesserung des

Komforts dar, hier dargestellt durch die anforderungsgerechte Klimatisierung des Innenraums. Moderne Verbrennungsmotoren und gerade auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge produzieren bei geringer Last so wenig Abwärme, dass eine ausreichende Innenraumheizung auf konventionellem Weg nicht mehr gewährleistet ist. Um den nötigen Innenraumkomfort dennoch bereitzustellen, werden Zusatzheizaggregate verwendet, die das Wärmedefizit ausgleichen.

Ein zunehmend wichtiger technologischer Baustein ist hierbei die Wärmepumpe, die Wärme von einem geringen Temperaturniveau auf ein höheres Niveau unter Aufwendung von Energie transferiert. Verläuft hingegen der Wärmetransport von einem hohen auf ein niedriges Temperaturniveau, spricht man von einer Klimaanlage. Die Wärmepumpe beziehungsweise Klimaanlage kann thermisch, thermoelektrisch oder von einem Kompressor angetrieben werden. Eine Alternative zur Verwendung einer Wärmepumpe als Zusatzheizgerät sind PTC-Heizer, die hochdynamisch Wärme bereitstellen können.



Funktionsweise einer thermoakustischen Kälteanlage



Ablauf des Funktionsentwicklungsprozesses im Rahmen des Thermomanagements

Durch die steigende Anzahl von technologisch unterschiedlichen Geräten wird es zunehmend anspruchsvoller, das jeweils optimale Konzept für ein Fahrzeug zu finden. Um verschiedene Kühlkonzepte schnell und aussagekräftig vergleichen zu können, hat Porsche Engineering eigene Simulations- und Berechnungstools entwickelt.

Im Bereich der konventionellen Klimatisierung des Innenraumes kommen kompressorgetriebene Kälteanlagen zum Einsatz. Hier wird in einem hermetisch geschlossenen Kreislauf ein gasförmiges Medium durch einen Kompressor verdichtet. Im nachgelagerten Kondensator verflüssigt sich das verdichtete heiße Kältemittel unter Wärmeabgabe an die Umgebung. Die Wärme kann hierbei entweder an die Luft im Frontend des Fahrzeugs abgegeben werden oder, alternativ, an einen in das Gesamtfahrzeugkühlsystem integrierten Kühlkreislauf. Über eine Drossel gelangt das flüssige Kältemittel in einen Verdampfer, wo es seinen Aggregatzustand von flüssig nach gasförmig ändert und dabei Wärme

aufnimmt. Die wärmere Kabinenluft wird über den Verdampfer geleitet und dadurch abgekühlt, was bei hohen Außentemperaturen für ein angenehmes Innenraumklima sorgt. Im Winter kann dieser Prozess umgekehrt werden, sodass die Klimaanlage nun zum Heizen genutzt wird und somit als Wärmepumpe arbeitet.

Im Kfz-Bereich kommt bei Klimaanlage hauptsächlich das Kältemittel R134a zum Einsatz, welches jedoch in den nächsten Jahren sukzessive durch weniger klimaschädliche Alternativen ersetzt werden wird. Neben R1234yf werden auch natürliche Kältemittel wie Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), in Fachkreisen R744 genannt, als Ersatz verwendet. Gerade die Kältemittelalternative CO<sub>2</sub> erfordert innovative Lösungsansätze, um im Fahrzeug einen effizienten Kühl- und/oder Heizkreislauf für Passagiere und Komponenten aufbauen zu können.

Das Repertoire der Thermodynamiker bei Porsche Engineering umfasst noch weitere innovative Lösungen. Ein inte-

ressantes Beispiel ist die thermoakustische Klimaanlage (Abbildung Seite links, unten). Hier wird thermische Energie aus dem Motor genutzt, um einen Resonator in Schwingung zu versetzen. Diese Schwingungen dienen als Antrieb einer Kälteanlage. Hierzu sind neben dem Resonator sogenannte Stacks notwendig. Stacks sind Bauteile, die die thermische Energie in Schwingungen wandeln können und umgekehrt. Ein Stack (Treiber) erzeugt durch ein extern angelegtes Temperaturgefälle einen Druckunterschied und damit eine akustische Anregung im Resonator. Die dadurch erzeugte Anregung wird an dem zweiten Stack (Generator-Stack) wiederum in ein Temperaturgefälle umgewandelt, sodass die hier entstehende heiße und kalte Seite als Wärmepumpe genutzt werden kann. Diese ohne bewegte Teile arbeitende Alternative hat den Vorteil, lediglich mit Motorabwärme zu funktionieren. >

## Emissionsreduktion

Neben den Gebieten Bauteilschutz und Komfort spielt modernes Thermomanagement zunehmend auch im Rahmen der Entwicklungen für die CO<sub>2</sub>-Reduktion eine wichtige Rolle. Der bekannte Motorthermostat allein ist beispielsweise für das Thermomanagement moderner Motoren nicht mehr ausreichend. Während des Warmlaufs kann jedes Grad mehr an Motortemperatur zur Emissionsreduktion beitragen.

Um die vom Motor generierte Abwärme effizient nutzen zu können, werden stehendes Wasser, integrierte Abgaskrümmer oder das sogenannte Splitcooling verwendet. Damit nutzbare Motorabwärme nicht an die Umgebung verloren geht, sind Motorkapselung und die korrekte Wahl der Kühlsystemgröße explizit zu berücksichtigen. Von Bedeutung ist hier auch eine optimierte Ventilsteuerung, die dazu beiträgt, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und die Abwärme zu minimieren.

Die wirksame Kühlsystemgröße kann durch Ventile wie Thermostate oder Taktventile beeinflusst werden. Um zum Beispiel das dynamische Verhalten des Kühlsystems zu steigern, wird es verkleinert, indem thermischer Ballast wie Ausgleichsbehälter, Entlüftungsleitungen oder nicht benötigte Plattenwärmetauscher über das Steuergerät abgetrennt werden.

Eine bislang noch nicht angesprochene Grundaufgabe des Thermomanagements besteht in der Bestimmung des Wärmeintrags in das Kühlmittel. In Verbindung mit der Analyse von realen Motorwärmebilanzen auf dem Prüfstand werden auch Simulationen eingesetzt, um das Kühlsystem in den ersten Entwicklungsphasen konzeptionell auslegen zu können. Porsche Engineering setzt hierfür eine eigens entwickelte Software ein, die in Abhängigkeit von der Motorgeometrie, Zylinderzahl und

weiteren Kenngrößen das Verhältnis zwischen Wärmeintrag ins Kühlmittel und effektiver Motorleistung bestimmt.

Die ständige Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors hin zu immer weiter sinkenden Emissions- und Verbrauchswerten bringt ebenfalls erhöhte Anforderungen an das Thermomanagement mit sich. Beim Downsizing etwa kommen aufgeladene Motoren zum Einsatz, die über eine hohe spezifische Leistung, ein breites Drehzahlband mit maximalem Drehmoment und gutes transientes Verhalten verfügen. Die hierfür erforderliche Abgasturboaufladung führt jedoch auch zu erhöhten Restgasgehalten sowie höheren Temperaturen und Drücken im Brennraum, welche eine stärkere Klopfneigung des Motors nach sich ziehen. Zur Vermeidung des Klopfens ist eine spätere Zündung notwendig. Dies hat jedoch eine spätere Schwerpunktlage der Verbrennung und somit eine Reduktion des Motorwirkungsgrades zur Folge.

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, beschäftigt sich Porsche Engineering mit Möglichkeiten zur Reduktion der Ansaugtemperatur. Kühlere Ansaugluft reduziert sowohl die Klopfgefahr als auch die Abgastemperatur, was die Effizienz wieder erhöht und den CO<sub>2</sub>-Ausstoß verringert. Zwecks Reduzierung der Ansaugtemperatur werden Maßnahmen wie effizientere Ladeluftkühler, der Ansatz des Supercoolings oder der Einsatz von Kältemittelkühlung untersucht.

Emissionsreduktion kann nicht nur durch Bauteile und Komponenten erreicht werden, sondern auch durch intelligente Funktionen im Fahrzeug (siehe folgender Artikel). Bei vielen Komponenten im Fahrzeugkühlsystem kommt es darauf an, dass zum richtigen Zeitpunkt das Richtige geschieht. Nur so kann das Gesamtergebnis hinsichtlich Effizienz und Performance überzeugen. In diesem Rahmen ist es daher ebenfalls

notwendig, neue Funktionen zu entwickeln und diese dann auf den Fahrzeugsteuergeräten zu applizieren. Nur durch die Verbindung von Software und Hardware kann aus der im Fahrzeug integrierten Thermomanagementarchitektur das Optimum herausgeholt werden.

## Komplettpaket Thermomanagement

Das heutige Thermomanagement nimmt mit seinen drei großen Themenfeldern Bauteilschutz, Komfort und Emissionsreduktion eine wichtige Querschnittsfunktion im Gesamtfahrzeug ein. Konventionelle Kühlkonzepte stoßen zunehmend an ihre Grenzen und innovative Ansätze gewinnen an Bedeutung. Die steigende Komplexität erfordert ein besseres Verständnis und eine höhere Integration der betroffenen Themengebiete. ■

# Intelligente Funktionen

\_\_\_\_ Für ein aktives Thermomanagement in Fahrzeugen ist die Funktionsentwicklung für Kühlsysteme eine Grundvoraussetzung. In diesem Artikel erfahren Sie, wie genau diese beiden Themen zusammenhängen und wie Porsche Engineering das optimale Zusammenspiel im Entwicklungsprozess und in der Anwendung sicherstellt.

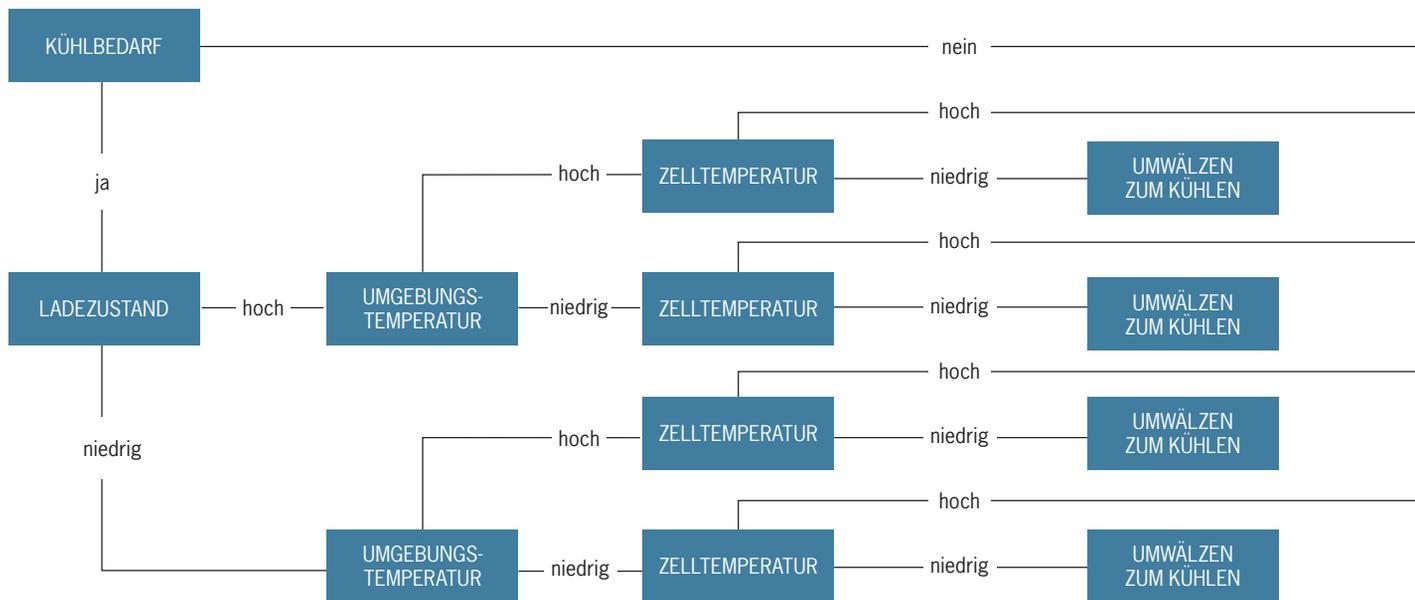
*Text: Thomas Warbeck*

Ein leistungsfähiges und effizientes Thermomanagement in Fahrzeugen erfordert nicht nur eine sorgfältige Auslegung von Kühlkreisläufen, sondern auch eine intelligente Steuerung der im Kreislauf verbauten Teile. Hierbei wird stets eine bedarfsgerechte Kühlung angestrebt, was bedeutet, dass jede Komponente wie zum Beispiel Verbrennungsmotor, Batterie oder E-Maschine im optimalen Betriebstemperaturbereich liegt und im Kühlsystem verbaute Lüfter und Pumpen nicht unnötig in Betrieb sind. Dadurch wird eine höhere Reichweite sowohl von brennstoffgetriebenen als auch von Elektrofahrzeugen ermöglicht. So werden beispielsweise Kühlerlüfter an kalten Tagen im Winter erst bei höheren Kühlwassertemperaturen zugeschaltet als im Sommer, wenn selbst nach Abstellen des Fahrzeugs für kurze Zeit oft noch Kühlbedarf besteht, um eine lokale Überhitzung von Kühlmiteln und Bauteilen zu vermeiden.

Solche Funktionen müssen im Entwicklungsprozess erarbeitet und schließlich im Motorsteuergerät hinterlegt werden. Besonders bei Prototypensteuergeräten erweist es sich als vorteilhaft, wenn sie schnell an neue Anforderungen und Messdaten angepasst werden können und mit der eigentlichen Entwicklung des Kühlkreislaufs einhergehen.

## **Von den Anfängen der Wasserkühlung zu schaltbaren Kühlkreisläufen mit Kennfeldthermostat**

Die einfachste und älteste Art der Motorwasserkühlung ist die Thermosiphonkühlung. Hier wird Wasser nur aufgrund der Dichteunterschiede von warmem und kaltem Wasser in Motor und Kühler umgewälzt. Nachdem warmes Kühlwasser vom Motor in den Kühler gelangt ist, wird es abgekühlt, sinkt nach unten und wird von dort dem Motor wieder >



Schematische Darstellung einer Batteriekühllogik als Basis für die Funktionsentwicklung

zugeführt. Durch Hinzufügen eines mechanisch angetriebenen Kühlerlüfters konnte Anfang des 20. Jahrhunderts die Effizienz gesteigert werden, auch wenn eine Regelung zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich war.

Der Einsatz einer Wasserpumpe verbesserte die Umwälzung, was zu höheren Kühlleistungen führte. Um eine schnellere Aufheizung des Motors nach dem Kaltstart zu ermöglichen, wurde in den Kreislauf schließlich ein Thermostatventil eingesetzt, wodurch das Kühlwasser temperaturabhängig über die Kühler oder an ihnen vorbeigeleitet werden konnte. Somit hatte das erste regelnde Element Einzug in den Kühlkreislauf gefunden.

### Stellglieder in Kühlkreisläufen

Während sich einfache Thermostate bei Erreichen der Betriebstemperatur öffnen und dem Kühlwasser den Weg zu den Kühlern freigeben, lassen sich moderne Varianten so ansteuern, dass die

Öffnungstemperatur des Thermostatventils zum Beispiel in Abhängigkeit von der Motorlast angepasst werden kann. Anfänglich wurde ein Lüfter mechanisch an den Motor gekoppelt und lief somit bei niedrigen Drehzahlen im Stand langsam und im Fahrzustand mit großem Kühlluftmassenstrom entsprechend schnell. Heute ist eine elektrische Ansteuerung möglich, die ein umgekehrtes Verhalten erzeugt.

In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden mechanisch drehzahlabhängige Wasserpumpen derzeit noch standardmäßig verbaut, jedoch sind elektrische und damit flexibel regelbare Wasserpumpen in Serienanwendungen immer häufiger vorzufinden. Hinzu kommen je nach Anwendung verschiedene Ventile, die zum Beispiel die Innenraumheizung vom Kreislauf zu- oder abschalten können.

### Mehr als nur ein Kühlkreislauf

In modernen Fahrzeugen wie zum Beispiel Hybriden ist ein einzelner Kreislauf

aufgrund der Vielzahl an unterschiedlich zu temperierenden Komponenten längst nicht mehr ausreichend. Das Kühlwasser im Verbrennungsmotor kann nicht zur Temperierung von Batterien benutzt werden, da deren Betriebstemperatur in der Regel weitaus niedriger ist. Die Abstimmung und der Wärmeaustausch zwischen den Kühlkreisläufen sind ebenfalls wichtige Teile des Thermomanagements, für die Kühlstrategien entwickelt und in Steuergerätefunktionen umgesetzt werden.

### Stetig steigende Nachfrage nach angepassten Funktionen

Insbesondere aufgrund der immer strenger werdenden EU-Vorgaben hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und anderen Emissionen wird eine intelligente Steuerung des Kühlsystems immer wichtiger. Für den Kunden sind darüber hinaus im Falle verschiedener hinterlegter Modi ein verminderter Verbrauch, gesteigerter Komfort oder auch herausragende Performance direkt spürbare Vorteile.



### **Funktionsentwicklung als Prozess, Entwicklung von funktionellen Kühlkreisläufen**

Die grundlegenden Funktionen im Kühlsystem werden bereits während der Auslegung des Kühlkreislaufes bestimmt. Verbaute Aktuatoren und Schnittstellen zwischen verschiedenen Kreisläufen geben einen gewissen Spielraum vor. Es stellt sich die Frage, anhand welcher gemessenen Werte von Temperaturen, Drücken oder auch vorgenommenen Einstellungen durch den Endkunden welche Aktuatoren verstellt werden sollen.

Zunächst werden die zu verwendenden Eingangsgrößen festgelegt und somit bestimmt, auf welche Parameter das Kühlsystem reagieren soll. Solche Eingangsgrößen können beispielsweise die Kühlwassertemperatur oder die Umgebungstemperatur sein, aber auch Drehzahl und Last des Verbrennungsmotors. Im Batteriekühlkreislauf ist darüber hinaus auch der Ladezustand zu berücksichtigen, da die von den Zellen abgegebene

Verlustleistung und damit der Kühlbedarf hiervon abhängig sind. Auch für eine elektrisch angeschlossene Batterieheizung ist diese Größe interessant.

Die Ausgangssignale sind überwiegend durch die verbauten Aktuatoren vorgegeben, jedoch können auch weitere Signale ausgegeben werden, die an anderen Stellen der Motorsteuergerätssoftware Verwendung finden. Dies kann beispielsweise dann der Fall sein, wenn die Anforderung zum Abschalten der Klimaanlage ans Motorsteuergerät gesendet werden soll.

Nach Definition der Ein- und Ausgangssignale werden die eigentlichen Funktionen beschrieben. In Abhängigkeit vom Betriebsmodus, dem Ladezustand der Batterie (SOC, engl. „state of charge“), der maximalen Zelltemperatur und der Umgebungstemperatur werden für jeweils unterschiedliche Kombinationen andere Setups gewählt. Wichtig ist ebenso die Definition von sinnvollen Parametern, die während der Applikation im Fahrzeug noch einfach geändert werden können. Grenzwerte für den Ladezustand, die Umgebungs- und maximale Zelltemperatur sind Beispiele hierfür.

### **Modellierung in MATLAB/Simulink**

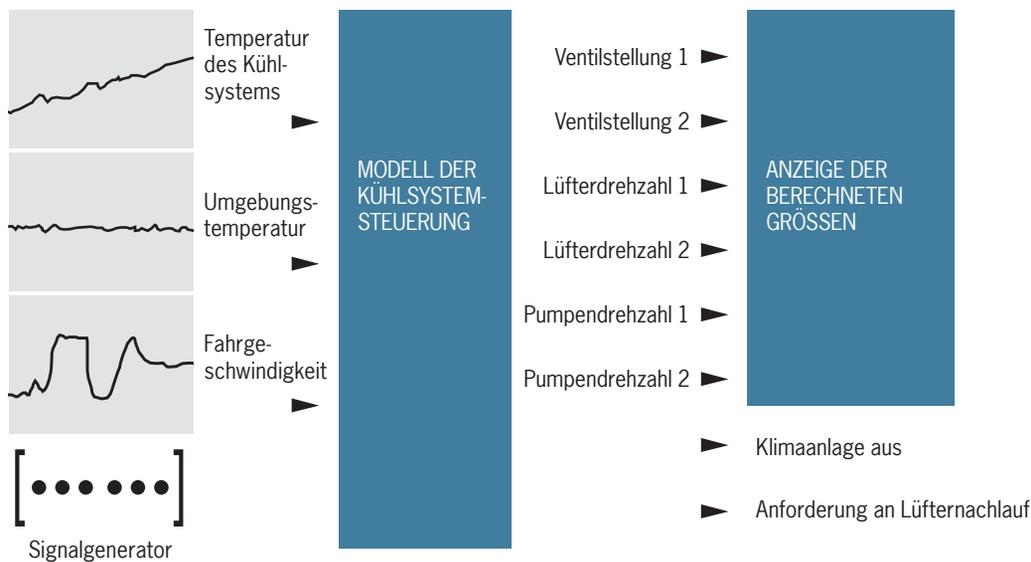
Nach dem Entwurf müssen die gewünschten Funktionen mithilfe geeigneter Software modelliert werden. Bei Porsche Engineering geschieht dies mittels MATLAB/Simulink. Die Modell-

und Simulationseinstellungen werden so gewählt, dass das Programm schließlich echtzeitfähig ist. Hierfür muss die Rechenzeit so kurz wie möglich gehalten werden, damit sämtliche Rechenprozesse auf dem Steuergerät weniger Zeit in Anspruch nehmen als das Zeitintervall, in dem die entsprechenden Messwerte übermittelt werden. Nur so lässt sich sicherstellen, dass die Ausgangssignale jeweils passend zu den entsprechenden gemessenen Eingangssignalen berechnet werden können.

Das fertige Modell kann nun zunächst in MATLAB/Simulink in einem ersten Schritt getestet werden, indem Eingangsvariablen mit zeitlichem Verlauf gezielt vorgegeben und die Ausgangswerte auf Plausibilität geprüft werden. Hierbei spricht man von „Model in the Loop“-Testing (MIL).

### **Virtueller Prototyp des Kühlsystems**

Ein weitaus näher an der Realität liegender Modelltest kann mithilfe einer gekoppelten Simulation stattfinden. In vielen Projekten von Porsche Engineering werden während der Entwicklung und Optimierung von Kühlkreisläufen mit Prüfstands- und Fahrzeugmessdaten validierte 1D-Modelle erstellt. Diese bilden die Physik des Fluids auf seinem Weg durch Elemente wie Kühler, Leitungen, Pumpen und Ventile sehr genau ab. Hierfür wird die Software GT-Suite verwendet, welche sich mit MATLAB/Simulink koppeln lässt. >



*Modellvalidierung des Kühlsystemfunktionsmodells mittels vordefinierter Testszenarien*

Der Einfluss der Kühlsystemsteuerung auf das Verhalten des Fahrzeugs kann somit direkt getestet werden, indem über die modellierte Steuerung in MATLAB/Simulink Parameterwerte wie zum Beispiel Ventilstellungen an GT-Suite übergeben werden. Das physikalische 1D-Modell wiederum übergibt Messwerte wie Temperaturen zurück an MATLAB/Simulink, die den dort modellierten Funktionen als Eingangsgrößen dienen.

Der enorme Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass schon frühzeitig die Kühlsystemfunktionen an die Physik im Kühlsystem des Fahrzeugs angepasst werden können und bereits ein erster sinnvoller Datenstand festgelegt werden kann, bevor überhaupt mit dem Fahrzeug gefahren wird. Da das Kühlsystemmodell ständig aktualisiert und auf den Fahrzeugzustand abgestimmt wird, kann die kostenintensive Testzeit im Fahrzeug deutlich reduziert werden. Das physikalische Modell fungiert gemeinsam mit dem Funktionsmodell als virtueller Prototyp, mit dem schnell und günstig gearbeitet werden kann.

**Vom Modell zum Code**

Nachdem das Modell in einem ersten Schritt validiert wurde, steht die Umwandlung zur Software an. Somit wird das Modell, das nur in MATLAB/Simulink lesbar ist, zu einem universell lesbaren Programmcode. Geschieht die Umwandlung mittels der dSPACE-Software TargetLink, kann die Software analog zum Modell direkt in der MATLAB/Simulink-Umgebung getestet werden. Hierbei handelt es sich um einen „Software in the Loop“-Test (SIL). Um die Software schließlich aufs Steuergerät, beispielsweise das Batteriemanagementsystem (BMS), übertragen zu können, wird diese in Maschinencode übersetzt und auf den Flash-Speicher des Geräts übertragen.

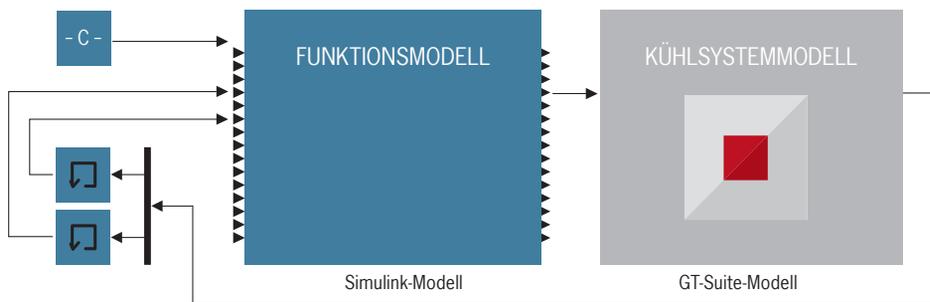
Mit einem speziellen Testaufbau ist es nun möglich, die Steuerung des Kühlsystems direkt an der später verwendeten Hardware zu testen. Über ein Hardware-Interface kann das Steuergerät mit den entsprechenden Aktuatoren und Sensoren verbunden werden, um

dort über eine ETK-Schnittstelle verschiedene Programm- und Datenstände direkt zu erproben. Zum einen kann somit die korrekte Ansteuerung und Bedatung der Aktuatoren und Sensoren überprüft und zum anderen die Logik der Kühlsystemsteuerung validiert werden. Eventuell auftretende Probleme lassen sich so einfacher erkennen und beheben als im aufgebauten Fahrzeug. Es handelt sich hierbei um ein „Hardware in the Loop“-Testing (HIL).

**Applikation im Prototyp, Tests in Weissach und Nardò**

Den nächsten Schritt in der Kette stellt die Applikation dar. Durch Fahr-Erprobung im Prototyp werden das Systemverhalten untersucht und die Modellparameter angepasst. Idealerweise müssen zu diesem Zeitpunkt nur noch kleinere Anpassungen am Modell gemacht werden, sodass während der Fahrt mithilfe der INCA-Software von ETAS vorrangig Änderungen in Kennlinien, Grenzwerten und Fahrmodi direkt vor-

C = Eingangsgrößen



Co-Simulation von Funktionsmodell und validiertem 1D-Kühlsystemmodell

genommen und bewertet werden können. Anstatt Parameter am PC oder Prüfstand vorzugeben, werden zum Bestimmen der Größen, unter anderem Geschwindigkeit und Umgebungstemperatur, mehrere Fahrzyklen gefahren, beispielsweise auf dem Porsche-Prüfgelände im Entwicklungszentrum Weissach oder auch auf den Strecken des Nardò Technical Centers. Zusätzlich können für die optimale Applikation der Thermomanagementfunktionen im Steuergerät Extrembedingungen – warm und kalt – im Klima-Windkanal simuliert werden.

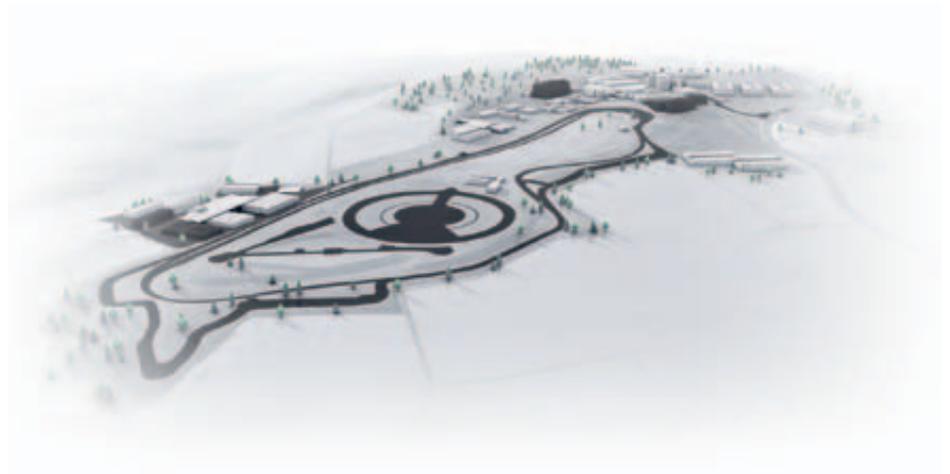
Am Ende der Applikationsphase steht ein finaler Stand von Programm und Parameterdaten, womit das Thermomanagement auch in der Serie fähig ist, erarbeitete Regelstrategien und Funktionen darzustellen.

### Der Blick auf das gesamte Fahrzeug

Porsche Engineering hat stets das große Ganze im Blick. Um die Funktionalität

im Fahrzeug zu garantieren, geht mit der Entwicklung von Kühlsystemen die dazugehörige Funktionsentwicklung einher. Durch die Vernetzung dieser beiden

Aufgabenbereiche und die stetige Betrachtung aus der Gesamtfahrzeugperspektive erhält der Kunde erstklassige Entwicklungsdienstleistungen. ■



Prüfgelände des Porsche-Entwicklungszentrums in Weissach

# Optimale Batterietemperierung

— Nur eine optimale Temperierung der Batterie gewährleistet in Elektro- und Hybridfahrzeugen die Reichweitenziele und gewünschte Funktionalität. Wir geben Einblicke in die drei Phasen der speziellen Entwicklung des Stromspeichers.

*Text: Manuel Groß*

Trotz der immer noch beschränkten Reichweite von Elektrofahrzeugen sind die Fahrleistungsanforderungen gerade bei Sportwagen sehr hoch. Die heutigen Lithium-Ionen-Zellen können zwar die notwendigen Leistungen liefern, verursachen dabei aber auch große Kilowatt-Verluste. Um die als Wärme auftretenden Verluste aus dem Batteriesystem abzuführen, ist ein erheblicher Kühlaufwand notwendig. Die zur Kühlung benötigte Energie reduziert die im Vergleich zu Benzinfahrzeugen ohnehin schon geringere Reichweite noch weiter. Die Kühlung muss daher möglichst effizient ausgeführt werden. Wie schon im Artikel „Effizientes Zusammenspiel“ (ab Seite 12) diskutiert, ist auch das Heizen des Innenraums ein Problem: Anders als beim klassischen Verbrennungsfahrzeug steht bei kalten Temperaturen nicht mehr genug thermische Energie als nutzbare Abwärme zur Verfügung. Die zum Heizen zusätzlich benötigte Energie lässt die Reichweite des Fahrzeugs abermals sinken. Kundenerwartungen, die sich

bei Funktionalität, Reichweite und Komfort auf konventionelle Fahrzeuge beziehen, müssen jedoch auch von Batteriefahrzeugen erfüllt werden, sollen diese am Markt bestehen können. Dies verlangt neue technische Lösungen.

## Die optimale Batterietemperatur

Um eine Batterie zu temperieren, muss zunächst die optimale Betriebstemperatur einer Batteriezelle bekannt sein. Die Lithium-Ionen-Batterie kann bei Betriebstemperaturen von ca.  $-20^{\circ}\text{C}$  bis ca.  $+50^{\circ}\text{C}$  betrieben werden. Außerhalb dieser Grenzen kann es zur Veränderung der Zellchemie kommen, welche die Batterie überdurchschnittlich schnell altern (degradieren) lässt. Gerade tiefe Temperaturen bewirken zusätzlich einen rapiden Anstieg des Innenwiderstands und schränken so die Leistungsfähigkeit der Batterie stark ein. Deshalb werden Lithium-Ionen-Batterien oft beheizt oder zumindest thermisch isoliert, um ein Auskühlen zu verlangsamen.

Bei der Bestimmung der optimalen Batterietemperatur muss der jeweilige Zelltyp genau betrachtet werden. Unterschiedliche Zelltypen haben unterschiedliche Zellchemien und geometrische Formen, was bei der Integration der Batterie in das Kühlsystem von Anfang an zu berücksichtigen ist. Je nachdem ob eine direkte Kühlung der Zellen oder eine indirekte Kühlplattenlösung umgesetzt wird, ist auch das passende Kühlmedium zu wählen. Als Kühlmedien stehen den Ingenieuren bei Porsche Engineering Wasser/Glykol, Thermoöle, Luft und Kältemittel zur Verfügung.

## Real oder Numerik – Hand in Hand zu einem perfekten Produkt

Zur Bestimmung und thermischen Beschreibung von Randbedingungen und Systemgrenzen des komplexen Wärmesystems Batterie werden transiente Wärmeberechnungen und unterschiedliche Materialeigenschaften in Betracht gezogen. Entsprechende Überschlags-

rechnungen können jederzeit händisch mithilfe von vereinfachten Formeln der Thermodynamik gemacht werden.

Da diese Grundgleichungen nur begrenzte Aussagekraft besitzen, werden im Thermomanagement spezielle kommerzielle oder eigens von Porsche Engineering entwickelte Tools verwendet, die über numerische Näherungsverfahren auch ein transientes Verhalten der Batterie hinreichend genau abbilden können. Mit den unterschiedlichen Simulationsmethoden lassen sich dann neue Batteriekühlsysteme entwerfen und bestehende Kühlsysteme weiter optimieren.

Die eingesetzten Tools unterscheiden sich jeweils deutlich in ihrer Komplexität und werden abhängig von Projektstand und -tiefe gezielt eingesetzt. Beispielfhaft sind im Folgenden die Abläufe und eingesetzten Tools im Rahmen der drei Phasen der Batterie-Thermomanagemententwicklung dargestellt.

### Feasibility-Phase: Ideen bewerten

Wie bei jedem Projekt steht auch hier zu Beginn eine Idee, die es zunächst hinsichtlich der technischen Machbarkeit zu bewerten gilt. In dieser ersten Phase werden eine Vielzahl von Varianten simuliert und Informationen verarbeitet, um Risiken und Potenziale der Idee abschätzen zu können. Für schnelle aussagekräftige Informationen hat Porsche Engineering ein Thermomanagementtool entwickelt, es basiert auf MATLAB/Simulink und kann für Abwärme-Berechnungen des Gesamtfahrzeugs verwendet werden.

Um Überhitzungen an der Batterie zu vermeiden, muss die produzierte Abwärme abgeführt werden. In Abhängigkeit von der Strombelastung und mithilfe von komplexen Innenwiderstandskennfeldern kann sie über einen Fahrzyklus bestimmt werden. Die Innenwiderstandskennfelder werden, wenn

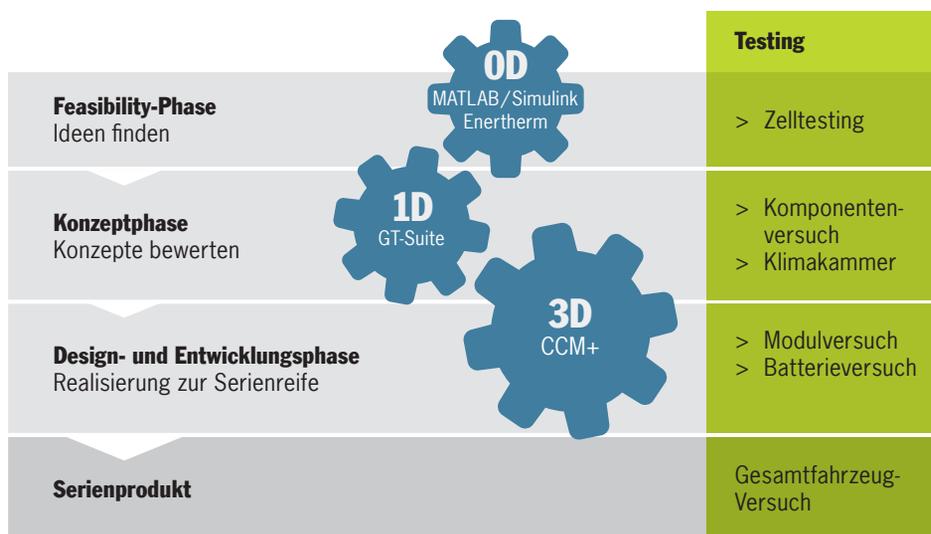
nicht vom Zellhersteller geliefert, auf Zellebene im Porsche-Engineering-Zellprüfstand aufgenommen. Somit lässt sich herausfinden, wie viel Abwärme produziert wird. Da es nur in seltenen Fällen sinnvoll ist, genau die Menge an Wärmestrom abzuführen, die die Batterie an Verlusten generiert, muss noch berechnet werden, wie viel tatsächlich über das Kühlsystem abtransportiert werden muss.

### Konzeptphase: Belastbare Lösungen finden

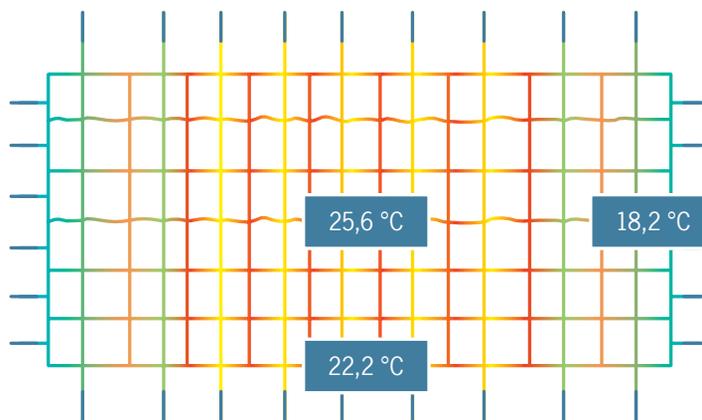
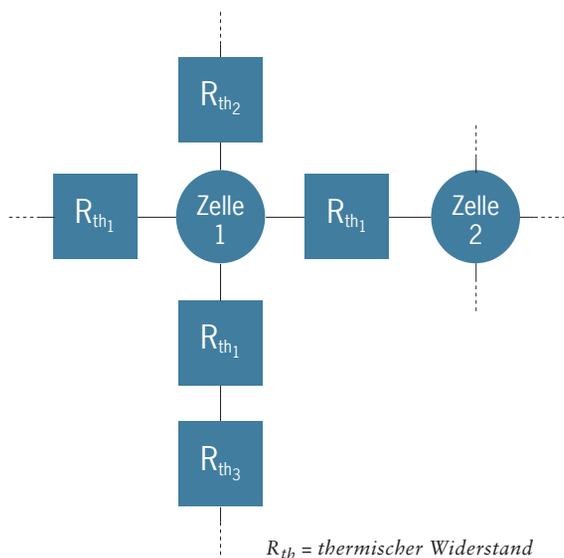
Hat das Projekt die Machbarkeitsphase erfolgreich bestanden, gilt es, konkrete technische Lösungen zu finden und zu vergleichen. Detailfragen in Bezug auf das passende Kühlmedium, ein geeignetes Kühlkonzept und die thermische Anbindung im vorhandenen Package werden nun analysiert.

Für jedes Konzept wird eine Kühlleistungsanalyse durchgeführt, welche quasi in 3D oder in 3D-CFD (Computational Fluid Dynamics) erfolgen kann. Diese Analyse zeigt das Potenzial eines jeden Konzeptes und muss beispielsweise Package-Restriktionen direkt in aussagekräftige thermische Ergebnisse umwandeln können. Unter Umständen muss hier jede einzelne Zelle betrachtet werden. Ein geeignetes Simulationsmodell würde dann das hochkomplexe thermische Netzwerk von mehr als 500 Zellen abbilden müssen.

Für die Bestimmung und Bewertung der Temperaturhomogenität auf Zell-, Modul-, und Batterieebene wird beispielsweise das Tool GT-Suite herangezogen. Abhängig vom Konzept kann auch eine CFD-Berechnung erforderlich sein, um die durch Fluide bedingte Homogenität bewerten zu können. Als Tool wird hier STAR-CCM+ verwendet. Wie gut beziehungsweise wie realgetreu eine Simulation ausfällt, ist abhängig vom Input. >



Beispielhafter Prozessablauf einer thermodynamischen Batterieentwicklung



Modellhafte Darstellung (links) des thermischen Netzwerks einer Einzelzelle als Basis einer 1D-Gesamtbatteriesimulation (rechts)

Zell-, Modul- und Kühlungsversuche gehen mit der Simulation einher und schließen die Lücke zwischen virtueller und realer Welt. Am Ende dieser Phase wurde ein optimales Konzept abgeleitet, welches nun in die Detaildesign- und Entwicklungsphase übergeben werden kann.

### Design- und Entwicklungsphase: Am Ende steht das Produkt

Protoypenbatterien sind im Projektverlauf erst zu einem relativ späten Zeitpunkt verfügbar. Die Applikation sowie die Fahr- und Betriebsstrategie müssen jedoch bereits früher entwickelt werden. Hierfür verwendet Porsche Engineering eigens entwickelte thermoelektrische Batteriemodelle, die auf Einzelzellebene Stromflussinhomogenitäten sowie Spannungs- und Temperaturdrifts abbilden können. Die Besonderheit dieser Modelle ist, dass sie in Echtzeit laufen und somit am Hybridprüfstand das Batterieverhalten für Steuergeräte und andere Hybridkomponenten emulieren können. MATLAB/Simulink und selbst erstellte

Modellbibliotheken werden als Tools verwendet. Entwicklungsbegleitend können 3D-Simulationen durchgeführt werden, um zum Beispiel kritische Wärmeübergangskoeffizienten zu bestimmen und an die anderen Modelle zu übergeben.

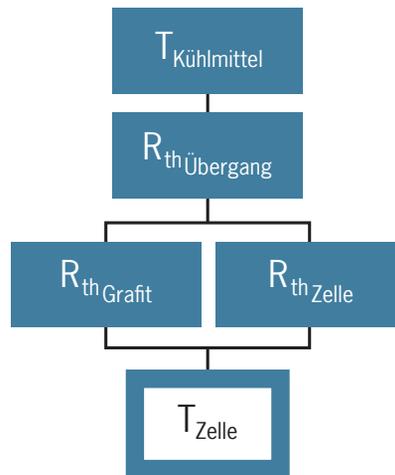
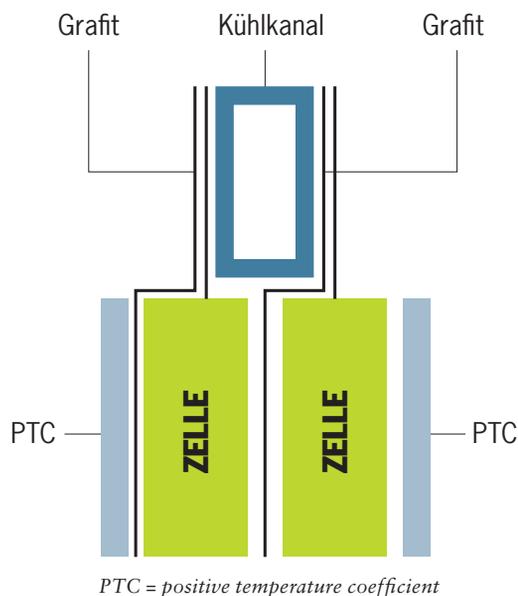
In der 3D-Simulation kann der Fokus sowohl auf das Temperaturverhalten als auch auf die hydraulischen Besonderheiten gelegt werden. CFD und Festkörpermodell werden hierbei gekoppelt, um den Wärmeübergang von der Zelle in das Fluid zu bestimmen. Durch Validierungsmessungen am eigenen Prüfstand können die Schlüsselparameter schließlich korrekt in Steuergeräten und Simulationsmodellen eingesetzt werden.

Für transiente Rechnungen eignet sich auch die 1D-Rechnung mit GT-Suite, insbesondere um bei dynamischen Fahrzyklen die Grenztemperaturen mit Aufheiz- und Abkühlzeiten darzustellen. Parametervariationen sind mithilfe dieser Methode besonders einfach durchzuführen. Materialdicken, Toleranzen

und Materialeigenschaften können variiert und deren Einfluss über einen Fahrzyklus bewertet werden. Als positiver Nebeneffekt besteht die Möglichkeit, das Batteriemodell mit dem Kühlkreislaufmodell zu koppeln. Im Rahmen der Funktionsentwicklung sind diese Modelle von großer Bedeutung, um auf Basis eines realitätsnahen Abbildes Software zu entwickeln und virtuell zu testen.

### Thermischer Widerstand – der Schlüssel zum Erfolg

Um das Verhalten der Batterie bei elektrischer Last und gleichzeitiger Kühlung genau zu beschreiben, ist die Kenntnis des thermischen Netzwerks des gesamten Batterieverbands notwendig. Zusammenfassen lässt sich dieses Netzwerk meist zu einem thermischen Widerstand. Ein thermischer Widerstand setzt sich dabei in der Regel aus mehreren thermischen Pfaden zusammen. Diese sind in der Elektrik mit einem Parallelen- und Reihenwiderstand zu vergleichen. In der



$T$  = Temperatur  
 $R_{th\text{Übergang}}$  = thermischer Übergangswiderstand  
 $R_{th\text{Grafit}}$  = thermischer Widerstand Grafit  
 $R_{th\text{Zelle}}$  = thermischer Widerstand Zelle

Überführung des Realaufbaus in ein thermisches Netzwerkmodell

oben stehenden Abbildung ist schematisch ein thermischer Pfad am Beispiel einer Batterie mit Pouchzellen und integrierter PTC-Heizung vereinfacht dargestellt.

Die Wärme wird von der Pouchzelle über die Grafitfolien in einem parallelen Pfad in Richtung Ableiter, hier den elektrischen Zellkontakt, geleitet. Über eine optimierte Kühlplatte wird die Wärme dann in das Kühlmittel geleitet. Um die Abwärme der Zellen effektiv zur Kühlplatte zu bringen, arbeitet Porsche Engineering speziell in der Batterietechnik mit neuen Materialien wie beispielsweise Grafit, Phasenübergangsmaterialien oder Heat Pipes. Hiermit können Wärmeleitkoeffizienten von über 1000 W/mK erreicht werden.

Leider sind gute Wärmeleiter immer auch elektrisch gut leitend. Eine gute elektrische Isolation ist in Hochvolt-Fahrzeugbatterien daher unverzichtbar. Um diesen Zielkonflikt zu lösen, muss ein optimaler Kompromiss zwischen Wärmeleitfähigkeit und Hochvoltsicher-

heit gefunden werden, was die Materialauswahl natürlich erheblich erschwert.

**Prüfprozesse von der Zelle zur Batterie – Querschnittsfunktion Testing**

Um das in einem komplexen Simulationsmodell aufgebaute thermische Netzwerk zu charakterisieren, ist eine detaillierte thermische Analyse am Prüfstand erforderlich. Werden die real gewonnenen Messdaten mit den Ergebnissen des thermischen Netzwerkmodells abgeglichen, können die sich ergebenden Unterschiede genutzt werden, um die Modellparameter präzise einzustellen. So wird sukzessive ein abgestimmtes und validiertes Simulationsmodell der Batterie entwickelt.

Das abgestimmte Modell ermöglicht es nun, Grenz- und Schwellenwerte von Steuererätfunktionen besser an die Randbedingungen wie die herrschende Umgebungstemperatur anzupassen. Da die Steuergeräte so schon vorappliziert werden können, bevor erste reale Proto-

typen verfügbar sind, beschleunigt sich die spätere finale Applikation im Gesamtfahrzeug deutlich.

**Ausblick**

Die Zukunft des Batterie-Thermomanagements hängt von den Entwicklungen in der Zellchemie ab. Aktuell beschäftigt sich die Laborforschung intensiv mit Lithium-Luft oder Lithium-Schwefel. In welche Richtung auch immer die Entwicklungen gehen werden, das Thermomanagement wird auf geeignete Art und Weise reagieren müssen. Dies kann zu Lösungen führen, die gegebenenfalls auch über die bisherige Automobiltechnologie hinausgehen. ■

EIN IDEALER BODEN FÜR REKORDE

# NARDÒ

\_\_\_\_\_ Eine Kreisbahn für Hochgeschwindigkeiten mit einer Länge von 12,6 Kilometern zu erbauen, ist keine einfache Angelegenheit. 1975 setzte Fiat diese Idee in die Realität um. Die Strecke sollte Forschungs- und Entwicklungsprozesse verbessern, indem Fahrzeuge unter extremen Bedingungen getestet werden konnten. Auf der Kreisbahn von Nardò wurden seither zahlreiche Geschwindigkeitsrekorde erzielt. Unterschiedlichste Fahrzeughersteller haben hier über die Jahre hinweg Testfahrten absolviert und dabei ihre Spuren hinterlassen, Geschwindigkeitslimits gebrochen – und Geschichte geschrieben.





**911-MODELLE:** Kraftstoffverbrauch (kombiniert)  
12,4–8,2 l/100 km; CO<sub>2</sub>-Emission (kombiniert)  
289–191 g/km; Effizienzklassen: G–F



1979

DER MERCEDES-BENZ C111-IV  
ERREICHT 403 KM/H

### Listenweise Rekorde

Am Eingang des Nardò Technical Center, das seit 2012 von Porsche Engineering betrieben wird, listet eine große Tafel die bedeutendsten Rekorde auf, die auf der Kreisbahn erzielt wurden. Sie würdigt besondere Leistungen und fasst die fast 40-jährige Rekordgeschichte zusammen. All diese Rekordleistungen wurden immer im Verborgenen vollbracht, weitab von Zuschauern und neugierigen Augen.

### 1979: Der Mercedes-Benz C111-IV erreicht 403 km/h

Der italienische Höchstgeschwindigkeitsrekord wurde von einem Mercedes-Benz C111-IV in Nardò aufgestellt. Dieser erreichte am 5. Mai 1979 exakt 403,978 km/h und brach damit die 400-km/h-Grenze. Am Steuer saß Hans Liebold, kein Rennfahrer, sondern Chefingenieur, der die „fliegende Runde“ auf der Nardò-Ringstrecke in 1:57 Minute absolvierte. Sein Fahrzeug war eine Sonderanfertigung mit einem 4,82-Liter-Biturbo-V8-Motor und einer Leistung von 373 kW (500 PS) bei 6200 U/min. Die riesige Mittelflosse und das lange Heck des Fahrzeugs standen in starkem Kontrast zu dessen ansonsten eher knappem Körper. Der Auftritt dieses Fahrzeugs auf der Ringstrecke war der Höhepunkt eines Projekts, das von der Marke mit dem Stern in den späten 1960er-Jahren begonnen wurde. >



1982

DER 928 S REVOLUTIONIERT  
PORSCHE



1983

EIN MERCEDES-BENZ 190 E 2.3-16  
GIBT 201 STUNDEN LANG VOLLGAS

### 1982: Der 928 S revolutioniert Porsche

Die kreisrunde Bahn in Nardò wurde speziell zum Erproben von Extremleistungen und Dauerläufen erbaut, wobei der Fokus auf dem Erreichen von Höchstgeschwindigkeiten lag. Konnte der Porsche 928 S genauso erfolgreich werden wie der legendäre Porsche 911? Vor dieser Herausforderung stand Porsche, als man sich mit der Kombination von Frontmotor und Hinterachsgetriebe von der ursprünglichen DNA der Marke abwandte. So neuartig das Auto auch erschien, im Prinzip hatten die deutschen Ingenieure einfach nur die Formel verändert – und damit ein ebenso erfolgreiches Ergebnis erzielt: Am 7. November 1982 brach Porsche den 24-Stunden-Rekord mit einem 4,7-Liter-V8 und 224 kW (300 PS) über eine Distanz von 6033 Kilometern, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 251,4 km/h.

### 1983: Ein Mercedes-Benz 190E2.3-16 gibt 201 Stunden lang Vollgas

Nach dem Porsche-Rekord im Jahr 1982 legte Mercedes kurz darauf entsprechend nach und unternahm vom 11. bis 21. August 1983 mit dem Rennwagen 190 E 2.3-16, der später die DTM-Serie dominierte und erst noch für die Nutzung auf öffentlichen Straßen zugelassen werden musste, eine Reihe von Rekordversuchen. Im Laufe dieser elf Tage stellte

das Fahrzeug Bestmarken außerhalb seiner Klasse sowie 25000- und 50000-Kilometer-Rekorde auf. Alle Beteiligten waren 201 Stunden, 39 Minuten und 43 Sekunden unter Höchstspannung. Die Sonderausführung der Limousine erreichte eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h, die durch eine veränderte Kraftstoffeinspritzung und die entfernte Servolenkung ermöglicht wurde.

### 1994: Max Biaggi auf der Violent Violet

Obwohl Nardò stets eine Teststrecke und nie die Bühne für tatsächliche Rennen war, liegt doch stets eine Art unausgesprochener Wettbewerb in der Luft, denn jedes Unternehmen für sich strebt nach Bestleistung. So brach Max Biaggi am 4. Juni 1994 im Sattel der Violent Violet – das von Fabio Fazi gebaute Motorrad – den Rekord für den „fliegenden Kilometer“: „Es war ein unglaubliches Erlebnis“, erinnert sich der Fahrer aus Rom, „ich konnte nur das Rauschen des Windes und den elektrischen Rotor hören und hatte das Gefühl, jeden Moment abzuheben. Anstelle des Triebwerks waren Bleibatterien installiert. Der Motor hatte ein unglaubliches Drehmoment und es gab keine Schaltung. Mit Druck auf einen Knopf am Lenker düste das Motorrad mit enormer Kraft davon. Zum damaligen Zeitpunkt war eine derartige Leistung von elektrischen Motoren absolut unerwartet.“ Max Biaggi wurde mit dieser Fahrt bei einer Geschwindigkeit von



1994

BERTONE Z.E.R.  
(ZERO EMISSIONS RECORD)



2000

PIRELLI ÜBERBIETET MIT SUZUKI DEN  
REKORD IM „FLIEGENDEN KILOMETER“

164,198 km/h in die Weltrekordliste der Fédération Internationale de Motocyclisme (FIM) eingetragen.

#### 1994: Bertone Z.E.R. (Zero Emissions Record)

Der Bertone Z.E.R. (Zero Emissions Record) war ein zigarrenförmiges Elektrofahrzeug, das auf den Bonneville Salt Flats in Utah die Amerikaner herausfordern sollte. Die Idee stammte von Oscar De Vita, Student der Ingenieurwissenschaften am Polytechnikum Mailand. „Das Fahrzeug glich in seiner Form einer Rakete und war lediglich so breit wie meine Schultern“, erinnert sich De Vita. „Ich hatte dieses Projekt – das Abschlussprojekt meines Studiums – bei Herrn Bertone eingereicht und er entschied sich dafür, dieses zu unterstützen und aktiv voranzutreiben. Die nötigen Untersuchungen im Windkanal waren innerhalb von acht Monaten abgeschlossen, währenddessen arbeitete ich intensiv am Elektromotor.“

Auch der Batteriehersteller Fiamm förderte das Projekt, um in diesem Zuge für Bleibatterien zu werben. „Anstatt für die Erprobung nach Amerika zu gehen, entschieden wir uns für Nardò, um dort den Versuch zu starten, den Rekord für die Ein-Stunden-Distanz zu brechen. Ziel war es, 200 Kilometer pro Stunde mit einem Elektromotor zu erreichen. Mit 199,882 Kilometer pro Stunde waren wir sehr nah dran. Da die Batteriespannung gegen Ende des Rennens aber leicht absank,

gelang es uns zunächst nicht ganz, die 200 km/h zu übertreffen. Mit Nickel-Cadmium-Batterien hätten wir die Geschwindigkeitsgrenze von 200 km/h überschritten“, so De Vita.

Dies war nur ein Vorgeschmack: „1995 entwickelten wir das Projekt weiter, um den ‚fliegenden Kilometer‘ auf der Nardò-Ringstrecke in Angriff zu nehmen. Bertone stellte das neue Projekt auf dem Genfer Auto-Salon vor.“ Der frühere Rallye-Weltmeister Sandro Munari lehnte es damals ab, diese Fahrt durchzuführen. Er fürchtete ein Sturzrisiko, bedingt durch die auf der Kreisbahn in Nardò wirkende Zentrifugalkraft. Schließlich setzte sich Oscar De Vita selbst hinters Steuer. „Ich manövrierte das Auto mit Vollgas direkt in die vierte Fahrspur mit der größten Kurvenneigung, aber zunächst konnten wir nicht mehr als 295 km/h erreichen.“ Doch der Erfolg stellte sich schließlich ein. Am Ende meldete De Vita über sein Helm-Mikrofon: „Ich bin über 300 Kilometer pro Stunde!“ Die Zeitmesser bestätigten den neuen Rekord: 303,977 km/h.

#### 2000: Pirelli überbietet mit Suzuki den Rekord im „fliegenden Kilometer“

Salvo Pennisi, Produktentwicklungsleiter im Bereich Kraftäder bei Pirelli und selbst Motorradfahrer, hat bereits 23 Geschwindigkeitsrekorde in Nardò erreicht. „Nardò“, >



2002

DER W12 – EIN AUTO, DAS BIS HEUTE  
SIEBEN WELTREKORDE HÄLT



2004

ELIICA, EINE 370-KM/H-LIMOUSINE  
AUS JAPAN

sagt Pennisi, „ist eine ideale Anlage, um leistungsstarke Reifen für Motorräder zu entwickeln, aber es ist auch ein Ort unvergesslicher Erinnerungen. Ich teilte mir meine Rekorde mit dem viermaligen Weltmeister Fabio Villa. Und es bedeutet mir viel, dass die Reifen für die Superbike-WM auf dem Phillip Island Circuit auf der Strecke in Apulien entwickelt wurden.“ In seiner Stimme schwingt Stolz mit, denn die Strecke trug entscheidend dazu bei, mehrere japanische Manager davon zu überzeugen, für die Erstausrüstung ihrer Motorräder Pirelli-Reifen zu wählen. „Im Jahr 2000 versuchten wir uns mit der Suzuki GSX 1300 R am Rekord für den ‚fliegenden Kilometer‘“, erläutert Villa. „Wir stellten diesen mit 306,598 km/h auf, was lediglich die Durchschnittsgeschwindigkeit beider Fahrten in entgegengesetzte Richtungen war. Während des zweiten Rennens erreichte ich tatsächlich 320 km/h.“

#### **2002: Der W12 – ein Auto, das bis heute sieben Weltrekorde hält**

Neben einem Reifen wurde auch schon ein Auto nach dem weltberühmten Testgelände „Nardò“ benannt: Der Volkswagen „W12 Nardò“, ein von Charlie Adair entworfenes Konzeptauto, wurde 2001 auf der Tokyo Motor Show vorgestellt. Das Fahrzeug stellte am 14. April 2001 mit den Fahrern Dieter Depping, Jean-François Hemroulle, Marc Duez,

Mauro Baldi, Emanuele Naspetti und Giorgio Sanna zehn Rekorde auf. Es war die spätere „W12“-Rekordversion, die am 24. Februar 2002 diese Leistungen noch mit einem 24-Stunden-Entfernungs- und Geschwindigkeitsrekord überbot: 7740,576 Kilometer wurden mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 322,891 km/h zurückgelegt. Das vom Wolfsburger Automobilhersteller entworfene Fahrzeug mit 441 kW (600 PS) und einem Drehmoment von 621 Newtonmeter wog lediglich 1200 Kilogramm. Bis heute, zwölf Jahre später, hält dieses Fahrzeug noch immer sieben Weltrekorde.

#### **2004: Eliica, eine 370-km/h-Limousine aus Japan**

Neun Jahre nach dem Bertone-Rekord setzte eine weitere Elektrolimousine ein deutliches Zeichen. Die Eliica („Electric Lithium-Ion battery Car“) war ein ausgefallenes Projekt, das von 40 Studenten der japanischen Keio-Universität unter Anleitung von Prof. Hiroshi Shimizu entwickelt wurde. Die Elektrolimousine verfügte über einen Achtradantrieb und acht Elektromotoren mit jeweils 60 kW (80 PS), insgesamt also 480 kW (640 PS), die aus einer Gruppe von insgesamt 80 Batterien in vier Reihen gespeist wurden. Das vollständige Aufladen auf 100 Volt dauerte ungefähr zehn Stunden. 2004 schoss das 2100 Kilogramm schwere Auto mit 370 km/h über die Kreisbahn in Apulien.



2005

NEUER REKORD MIT DEM  
KOENIGSEGG CCR

### 2005: Neuer Rekord mit dem Koenigsegg CCR

Loris Biccocchi stellte am 28. Februar 2008 mit dem Koenigsegg CCR auf der Kreisbahn einen Geschwindigkeitsrekord von über 388 km/h auf. Der von einem 4,7-Liter-V8-Motor angetriebene schwedische Sportwagen verfügte über 601 kW (806 PS) sowie eine Drehzahl von 920 Nm. Es ist relativ einfach, die Kreisbahn in Nardò mit bis zu 240 km/h zu befahren, da der Pilot bei dieser Geschwindigkeit nicht in die äußerste Fahrspur steuern muss. Bei dieser verhältnismäßig moderaten Geschwindigkeit verhält sich das Auto so, als ob es eine gerade Linie fahren würde. Bei höheren Geschwindigkeiten jedoch muss der Fahrer den Kurs mit dem Lenkrad korrigieren. Obwohl Biccocchi versuchte, die Reifenabnutzung gering zu halten und so wenig wie möglich zu lenken, kam er dennoch auf einen Lenkwinkel von 30 Grad.

### 2012: Panamera Diesel, 24 Hours Challenge, Economy Run

In den letzten Jahren hat sich der Fokus beim Testen von Fahrzeugen von der reinen Leistung hin zu mehr Effizienz verlagert. Porsche Italia organisierte 2012 den „Panamera Diesel, 24 Hours Challenge, Economy Run“. Der Zweck hinter diesen elektrisierenden 24 Stunden lag darin, die Besonderheiten des Porsche Panamera Diesel in Bezug auf Straßentauglichkeit bei hohen Geschwindigkeiten zu verdeutlichen.



2012

PANAMERA DIESEL, 24 HOURS  
CHALLENGE, ECONOMY RUN

Die Effizienz des Panamera Diesel wurde zur neuen Erfolgsstrategie: Diejenigen Fahrer, die mit einer absoluten Spitze von 18,9 km/l lediglich versuchten, Treibstoff zu sparen, wurden von Piloten geschlagen, die sparsames Fahren mit hoher Geschwindigkeit kombinierten. Im Grunde war langsames Fahren unnötig, im Gegenteil, die maximale Ersparnis wurde bei zulässiger Höchstgeschwindigkeit gemäß Straßenverkehrsordnung erreicht. Die drei Panamera-Modelle legten eine Entfernung von insgesamt 7967 Kilometern zurück, wobei die Durchschnittsgeschwindigkeit bei circa 120 km/h und der Verbrauch bei 6,1 l/100 km lag, was den Vorgaben des Herstellers entsprach.

Wer weiß schon, welche Überraschungen der nächste Rekordversuch in Nardò bereithält? Die Technik jedenfalls schreitet ständig voran und der Mensch wird immer Gefallen daran finden, die Grenzen des Fortschritts auszuweiten ... ■

---

**PANAMERA DIESEL:** Kraftstoffverbrauch (kombiniert) 6,4 l/100 km; CO<sub>2</sub>-Emission 169 g/km, Effizienzklasse B



# LE MANS

# Die Rückkehr

— Kompakt und leicht, dennoch leistungsstark, hocheffizient und innovativ – so kehrte Porsche nach 16 Jahren in die Topklasse LMP1 des Langstreckenrennens zurück. Mit der Entwicklung des 919 Hybrid haben die Ingenieurinnen und Ingenieure die eigenen Kernkompetenzen erneut vorangetrieben und ermöglichten so einen beindruckenden Neuaufakt.





*Die Ingenieure der teilnehmenden Automobilhersteller stellten sich der Herausforderung, den Energieverbrauch der Fahrzeuge zu reduzieren. Das Ergebnis: Rennwagen, die mit unterschiedlichsten Lösungen unter der Karosserie auf die Strecke geschickt wurden.*



*Gespannt verfolgten Andreas Seidl, Porsche-Teamchef, Wolfgang Hatz, Vorstand für Forschung und Entwicklung der Porsche AG, und Fritz Enzinger, Leiter LMP1 (von links nach rechts), in der Box das Rennen und die Performance der Porsche-Fahrzeuge.*

Das 24-Stunden-Rennen von Le Mans ist das berühmteste Langstreckenrennen der Welt. Bereits 1951 – die Produktion der ersten Sportwagen in Stuttgart-Zuffenhausen läuft erst seit März des Vorjahres – wagt sich eine kleine Abordnung der Porsche KG an den Hochgeschwindigkeitskurs 200 Kilometer westlich von Paris. Der Klassensieg des 356 SL Leichtmetall-Coupé gleich beim ersten Start markiert den Beginn einer der ganz großen Legenden des Motorsports: Porsche und Le Mans. Nur Porsche ist seit 63 Jahren jedes Jahr am Start und der Lohn dieser einzigartigen Ausdauer ist eine Reihe von Rekorde, darunter 16 triumphale Gesamtsiege bei 102 Klassensiegen. Der sportliche Wettkampf und der Erfolg auf der Top-ebene des Motorsports in einer der berühmtesten Arenen der Welt gehören zu Porsche wie die Zahlenkombination 911.

### **Die Rückkehr 2014**

Seit 1998 war Porsche nicht mehr in der Topklasse Le-Mans-Prototyp-1 (LMP1) des Rennsports angetreten. Dorthin kehrte der Stuttgarter Sportwagenhersteller in diesem Jahr zurück und stellte sich mit dem innovativen 919 Hybrid dem neuen FIA-Effizienzreglement, das den Energieverbrauch pro Runde limitiert. Wolfgang Hatz, Vorstand für Forschung und Entwicklung der Porsche AG, erklärt die Rückkehr in die Spitzenklasse der Sportwagen-Weltmeisterschaft WEC wie folgt: „Wir waren und sind ja im GT-Bereich bestens aufgestellt, aber für die Marke war es an der Zeit, wieder in den Spitzensport einzusteigen. Soweit ich mich entsinnen kann, gab es nie ein Reglement, das den Ingenieuren so viel Freiheit gegeben und so viel Innovationskraft abverlangt hat. (...) Die Verpflichtung der Hybridisierung und die Effizienzformel sind revolutionäre Herausforderungen, und am Ende wird der Porsche-Kunde davon profitieren.“

### **Neues Reglement**

Nicht nur die Rückkehr von Porsche nach Le Mans, sondern auch das technisch anspruchsvolle Reglement war für dieses Jahr geradezu revolutionär: Mit einem Zwang zur Verbrauchsreduzierung machte die Fédération Internationale de l'Automobile (FIA) und der Automobile Club de l'Ouest (ACO) die schnellsten Sportwagen der Welt fit für die Zukunft. Um die Innovationskraft anzustacheln, erhielten die Ingenieure eine nie da gewesene Freiheit, denn FIA und ACO verzichteten darauf, ein einheitliches Hybridsystem vorzuschreiben. Auch waren weder Hubraum noch Zylinderzahl limitiert. Diesel oder Benzin, Turbo ja oder nein, die Entscheidungen waren frei. Ob ein oder zwei Rückgewinnungssysteme, ob Batteriespeicher, Ultrakondensator oder Schwungrad, alles nach Belieben. So tüftelten die Ingenieure der teilnehmenden Automobilhersteller um die Wette und wägen Vor- und Nachteile aller Parameter gegeneinander ab. Von außen betrachtet kamen die Unternehmen zu ähnlichen Ergebnissen, doch genauere Untersuchungen zeigten, dass unter der Karosserie die Entwicklungen nicht unterschiedlicher hätten sein können.

### **919 Hybrid: die Technik**

Bei der Konzeption des Verbrennungsmotors hat sich Porsche für einen Weg entschieden, der zur DNA der Marke passt: Ein Benzinmotor befeuert den neuen Porsche 919 Hybrid. Dabei handelt es sich um einen extrem kompakten und hoch aufgeladenen Zweiliter-V-Vierzylindermotor mit Direkteinspritzung und einer Leistung von über 370 kW (500 PS) – hocheffiziente Verbrennung in einem Downsizingmotor.

Zur Energierückgewinnung setzte Porsche zwei Systeme ein. An der Vorderachse rekuperiert der 919 Hybrid die beim Bremsvorgang frei werdende Bewegungsenergie (kinetische Energie). Fundamental neu ist das zweite System: die Rückgewinnung aus Abgasenergie. Der Generator wird über eine Turbine angetrieben, die ähnlich wie ein Fahrraddynamo elektrische Energie erzeugt. Gespeichert wird diese Energie in einer mit Flüssigkeit gekühlten Lithium-Ionen-Batterie. Wenn der Fahrer sie von dort abrufen, treibt ein mehrere Hundert PS starker Elektromotor damit die Vorderachse an und der 919 Hybrid verwandelt sich somit beim Boosten in einen traktionsstarken und leisen Allradler. Mit der Entwicklung beider Rückgewinnungssysteme und der Speichertechnologie hat die Porsche AG zusammen mit dem hauseigenen Ingenieurdienstleister Porsche Engineering die eigenen Kernkompetenzen vorangetrieben.

### Rennausgang und Fazit

Es waren 24 Stunden unter Spannung, der Sieg so hart umkämpft wie seit Langem nicht mehr. Mit den Startpositionen zwei und vier nach dem Qualifying zeigten die beiden Hybride von Anfang an, dass sie konkurrenzfähig sind. Nach einem spannenden Rennauftakt mit wechselhaftem Wetter, zahlreichen Ausfällen und einer vergleichsweise ruhigen Nacht rückte Timo Bernhard mit dem Porsche 919 Hybrid nach 20 der 24 Stunden auf die erste Position vor. Um 12:36 Uhr übergab er sein Auto mit der Startnummer 20, weiterhin in Füh-

rung liegend, an Mark Webber. Doch nur knapp 20 Minuten später verlangsamte der Australier und rollte rein elektrisch zurück in die Box. Die Ursache war ein Schaden im Antriebsstrang – für die Mechaniker nicht reparabel. Auch der zweite Prototyp, gefahren vom Trio Romain Dumas, Neel Jani und Marc Lieb, konnte seine Leistungsfähigkeit lange Zeit unter Beweis stellen, wurde dann jedoch aufgrund eines Getriebeproblems zurückgeworfen und schließlich um 12:54 Uhr, auf Rang vier liegend, in die Box geschoben. Dieses Fahrzeug mit der Startnummer 14 kehrte zwar kurz vor Rennende noch einmal auf die Strecke zurück, überquerte die Ziellinie aus eigener Kraft, wurde aber ebenfalls nicht mehr gewertet.

Trotz der zunächst vorherrschenden Enttäuschung insbesondere natürlich unter den Teammitgliedern, aber auch unter den Fans, überwiegt im Nachhinein doch die Freude und das Erfolgsgefühl. „Wir haben bei unserer Rückkehr nach Le Mans eine hervorragende Mannschaftsleistung gezeigt. Der Traum, unseren ersten Einsatz bei diesem Langstreckenmythos mit dem Porsche 919 Hybrid auf einem Podestplatz zu beenden, wäre fast in Erfüllung gegangen. Über längere Zeit durften wir sogar Führungsluft atmen. Wir blicken jetzt nach vorne und kommen 2015 umso stärker wieder“, so das Fazit zum Rennen von Matthias Müller, Vorstandsvorsitzender der Porsche AG. Trotz ausgebliebenem LMP1-Sieg stand ein Gewinner der Porsche-Rückkehr zur Spitzenklasse schon vor dem ersten Rennen fest: der Kunde – denn die gewonnenen Erkenntnisse und gesteigerte Entwicklungskompetenz haben unmittelbaren Einfluss auf den Serienbau der Zukunft. ■



*An der Box zählt jede Sekunde: Ob der 919 Hybrid mit seinen innovativen Rückgewinnungssystemen überzeugen kann, hängt nicht nur von der Entwicklungskompetenz der Ingenieure ab. Auch die Performance des Teams an der Strecke muss stimmen.*

# Batterieentwicklung für den 919 Hybrid

Im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten für die Rückkehr nach Le Mans hat sich Porsche dazu entschieden, die Batterieentwicklung intern vorzunehmen. Porsche Engineering hat in den letzten Jahren bereits eine Vielzahl an Batterieprojekten erfolgreich durchgeführt und übernahm für das neue LMP1-Rennfahrzeug die Energiespeicherentwicklung – von der mechanischen Struktur über die gesamte Systemsteuerung bis hin zum Testing.

*Text: Michael Fürstner*

*Zwei Rekuperationssysteme machen den 919 Hybrid zum echten Porsche. Die Abgasenergie-Rückgewinnung ermöglicht die Ladung der flüssigkeitsgekühlten Lithium-Ionen-Batterie nicht nur beim Bremsen, sondern nun auch beim Gasgeben.*



Die Entwicklung des Energiespeichers für den 919 Hybrid stellte die Ingenieure vor unterschiedlichste Herausforderungen:

## **Gewichtsprobleme und Platzmangel**

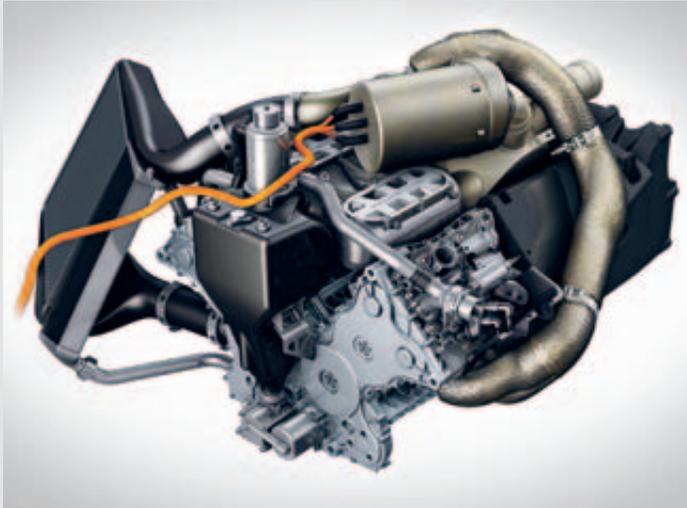
Ein niedriges Systemgewicht ist eine grundsätzlich hohe Anforderung und steht damit auch im Motorsport in der Prioritätenliste ganz oben. Auch der sehr beschränkt verfügbare Bauraum innerhalb des Fahrzeuges forderte die Ingenieurinnen und Ingenieure heraus. Das gesamte System befindet sich aus Sicherheitsgründen neben dem Fahrer im Monocoque – im crashgeschützten Bereich mit nur wenigen Millimetern Luft zu den angrenzenden Bauteilen. Es musste somit ein im Bauraum minimierter, außerge-

wöhnlich kleiner und leichter Energiespeicher entwickelt werden, ohne dabei Kompromisse hinsichtlich der elektrischen Systemleistung einzugehen. Denn die elektrische Antriebsmaschine an der Vorderachse des LMP1 verfügt über eine Leistung von mehr als 220 kW (300 PS), die natürlich ausreichend und zuverlässig versorgt werden muss.

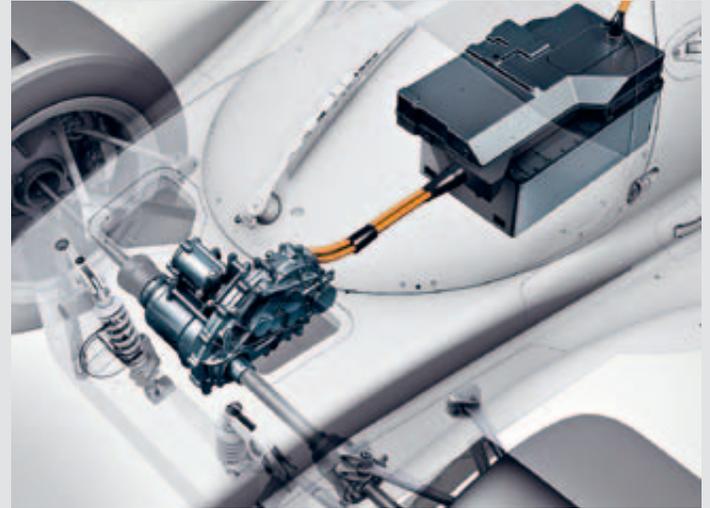
## **Hochspannung**

Gespeichert wird die elektrische Energie in Lithium-Ionen-Zellen von A123 Systems, die speziell für diese Motorsportanwendung entwickelt wurden und über ein besonderes Schweißverfahren zu kompakten Modulen zusammengefasst werden. Dabei hat jedes einzelne Modul weniger als 60 Volt. Diese

Modulbauweise ist unter anderem aus Sicherheitsaspekten bei der Montage des Gesamtsystems wichtig, da in Gleichstromanwendungen der Hochvoltbereich bei 60 Volt beginnt und damit bereits im gesundheitsgefährdeten Bereich liegt. Die Gesamtsystemspannung des 919 Hybrid liegt deutlich über den in Elektrofahrzeugenanwendungen heute üblichen 300 bis 400 Volt. Höhere Spannungen erlauben kleinere Querschnitte der laststromführenden Teile, was wiederum zu reduziertem Gewicht führt. Allerdings standen die für die Entwicklung der Speichersteuerung benötigten Bauteile nicht unmittelbar bei Lieferanten zur Verfügung – die Systemspannungen in diesem Bereich sind beispielsweise in Lokomotiven zu finden, welche aus Traktionsgründen allerdings eher auf



*Performance und Effizienz: ein V4-Zylindermotor mit Benzindirekteinspritzung, Turboaufladung und Abgasenergie-Rückgewinnungssystem für den Porsche 919 Hybrid.*



*Der Single-Elektromotor verteilt seine Kraft bei Bedarf über ein Differenzial an beide Vorderräder, die hochmoderne Batterie-Energiezentrale ist mittig im Fahrzeug positioniert.*

ein hohes Eigengewicht ausgelegt sind. Somit mussten alle erforderlichen Bauteile individuell entwickelt und angefertigt werden.

### **Langlebigkeit**

Die Kühlung des Energiespeichers ist für die Lebensdauer von großer Bedeutung. Im 919 Hybrid führt die rechnerisch über Computational Fluid Dynamics (CFD) ausgelegte und ermittelte Flüssigkeitskühlung die Verlustwärme so zielsicher ab, dass unter Volllast im Betrieb über den gesamten Energiespeicher hinweg nur eine sehr kleine thermische Spreizung auftritt. Alle verbauten Zellen werden also thermisch und auch elektrisch sehr gleichmäßig belastet, was die Langlebigkeit des gesamten Energiespeichers positiv unterstützt.

### **Testing bis zum Limit**

Die mechanischen Belastungen aller Komponenten in einem Rennfahrzeug sind enorm. Durch die extremen Gesamtsystem-Antriebsleistungen der aktuellen LMP1-

Hybridfahrzeuge und den auch im 919 Hybrid eingesetzten Allradantrieb erreichen die Fahrzeugbeschleunigungen vor, in und nach jeder Kurve durch den extremen Grip fast Formel-1-Niveau. In der Höchstgeschwindigkeit liegen die LMP1 sogar etwas darüber, so wurden dieses Jahr in Le Mans über 330 km/h erreicht.

Im Fahrbetrieb müssen alle Bauteile die durch das extrem starre Monocoque weitergeleiteten Vibrationen aushalten, sowohl die Vibrationen des Antriebsmotors als auch jene aus den Straßenunebenheiten. Die in vielen Kurven vorhandenen Curbs (Streckenbegrenzungen) haben mehrere Zentimeter hohe Querrillen, durch die ein Fahrzeug beim Überfahren ordentlich durchgeschüttelt wird. Aus diesem Grund musste die Lagerung des Energiespeichers so ausgelegt werden, dass eben diese Belastungen bestmöglich gedämpft werden können, wobei weiterhin minimaler Platzbedarf und niedrigstes Gewicht als Bedingungen galten.

Um die Funktionalität sicherzustellen, wurde das neu entwickelte System schließlich auf den Prüfstand gestellt. Dort musste

es auf dem hydraulischen Shaker viele Stunden bei maximaler Vibrationsanregung standhalten. Zusätzlich wurde im Rahmen der Homologation durch einen Crashversuch die Lagerung und Befestigung des Speichers überprüft und gewährleistet.

### **Systemsteuerung und Kontrolle**

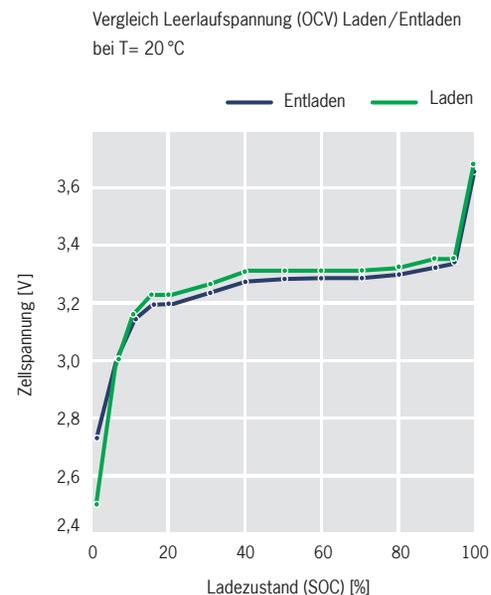
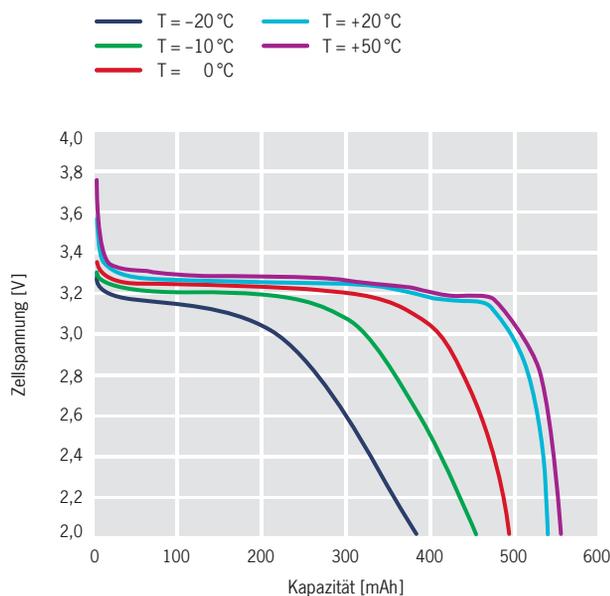
Ein wesentlicher Bestandteil des Systems stellt die integrierte Steuerungseinheit dar. Diese beinhaltet verschiedene Bauteile, z. B. Crash- und Stromsensoren, Relais zum Abschalten des Systems und von einzelnen Komponenten, Vorladewiderstände und Schnittstellen für die Leistungselektronik, die Sicherung sowie das Batteriemanagementsystem (BMS). Das BMS überwacht das gesamte Speichersystem, angefangen von den Temperatur- und Spannungswerten der einzelnen logischen Zellen, über die Berechnung des Ladezustandes mittels spezieller Algorithmen bis hin zur Auswertung der Crash-Sensorsignale. ■

# Unter Spannung

## Testing von der Zelle bis zur Batterie

\_\_\_ Elektromobilität beschäftigt die Automobilbranche mehr denn je und erfordert bei der Batterieentwicklung und beim Batteriemangement umfassende Kompetenzen. Umfangreiches Testing ist nötig, bevor Einzelzellen vielfältig eingesetzt und zu Modulen und Batterien komplex vernetzt werden können. Nur so kann die sichere und effiziente Funktionsweise von Zelle, Modul, Batteriekomponente und Gesamtbatterie unter verschiedenen Bedingungen gewährleistet werden – und damit auch die gewünschte Fahrleistung.

*Text: Emmanuel Dholand, Michael Geier, Manuel Groß,  
Florian Richter, Dr. Harald Schöffler*



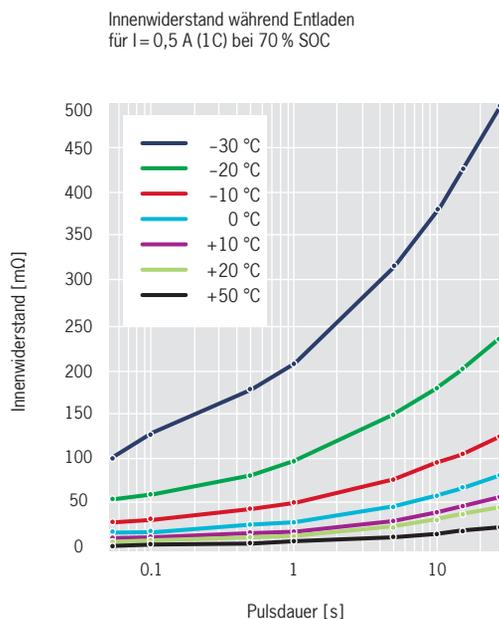
Standardmessungen von Kapazität (links), Leerlaufspannung (Mitte) und Innenwiderstand (rechts)

## Qualifizierung von Einzelzellen

Lithium-Ionen-Zellen sind die kleinsten Speichereinheiten einer Batterie. Aus ihnen werden durch Reihen- und Parallelschaltung Module erstellt, welche schließlich mittels Reihenschaltung miteinander zur Batterie verbunden werden.

Die Zellen werden in unterschiedlichen Bauformen und in verschiedenen Kapazitätsgrößen angeboten. Das ermöglicht eine optimale Auswahl in Bezug auf das Anwendungsgebiet und damit abgeleitet auf Spannung, Kapazität und Aufbau. Durch die Vielzahl von unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten bei gleichzeitig fehlender Normierung ist jedoch ein Vergleich der Zellen anhand der Herstellerangaben nur unzureichend möglich.

Aus diesem Grund wird bei Porsche Engineering für alle aktuell relevanten Zellen auf dem Zellprüfstand eine Basisvermessung durchgeführt, um einen identischen und damit vergleichbaren Datensatz der Eigenschaften unterschiedlicher Zellen zu erstellen und in einer Datenbank zu speichern. Mithilfe dieser Zelldaten können die elektrischen Eckparameter einer Batterie (z. B. Spannung, Strom und Verlustleistung) festgelegt beziehungsweise die Vorgaben verifiziert werden. Werden vom Auftraggeber nur die Fahrleistungen und Packagebedingungen vorgegeben, kann aus den in der Zelldatenbank abgelegten Daten die für die jeweilige Anwendung am besten geeignete Zelle ermittelt werden.



Verschiedene Bauformen von Zellen

Die Standardmessungen werden über den gesamten Temperaturbereich im Fahrzeug von  $-30 \text{ °C}$  bis  $+50 \text{ °C}$  durchgeführt. Zuerst erfolgt die Bestimmung der temperaturabhängigen Kapazität der Zelle. Anschließend wird für jeden Temperaturschritt bei verschiedenen Ladungszuständen die Leerlaufspannung (OCV) und der zeitabhängige Innenwiderstand der Zelle bestimmt. Diese Daten ermöglichen eine hinreichend genaue Berechnung der statischen und dynamischen Eigenschaften der Zelle, um eine Eignung für die geplante Batterie festzulegen.

Im Falle von Spezialanwendungen sind die aus den Standardmessungen gewonnenen Informationen oft nicht ausreichend, um eine vollständige Charakterisierung erstellen zu können. Dann werden am Zellprüfstand zusätzliche, spezifischere Messungen durchgeführt. So können zum Beispiel Spezialfälle wie die Leistungsfähigkeit der Zellen außerhalb ihrer Spezifikationen (etwa für extreme Kaltstarts), die Änderung der Standardparameter bei Alterung oder das Verhalten bei Versagen einer Einzelzelle untersucht werden. Damit kann das Einsatzspektrum der Batterie erweitert und entsprechend abgesichert werden. Zusätzlich sind aus solchen spezifischen Messungen Extrapolationen auf komplette Batterien möglich, die einen Leistungsvergleich mit bestehenden Batterien anderer Technologien, beispielsweise einer Bleibatterie, zulassen. >

## Der Zellprüfstand bei Porsche Engineering

Der Zellprüfstand, der bei Porsche Engineering für derartige Tests im Einsatz ist, integriert vier Messmodule, die einzeln oder parallel betrieben werden können. Zur Erhöhung des maximalen Stroms können die Module je paarweise zusammengesaltet werden, sodass entweder zwei Module mit doppelter Stromstärke zur Verfügung stehen oder ein Modul mit entsprechend vierfacher Stromstärke. Parallel zu den Messkanälen können bis zu 16 Temperatursensoren eingelesen und deren Messwerte zusammen mit den Spannungs- und Stromwerten abgespeichert werden.

Die Zellen werden in einer Klimakammer auf die vorgesehene Messtemperatur gebracht. Die regelbare Temperaturspanne reicht hier von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+120^{\circ}\text{C}$ . Gesteuert wird der Klimaschrank vom Prüfstand aus. Bei Temperaturänderungen pausiert der Programmablauf so lange, bis die Solltemperatur erreicht ist.

Der Prüfstand ist in einer eigenen Scriptsprache vollständig programmierbar, sodass Prüfpläne im Vorfeld erstellt bzw. aus bereits vorhandenen modifiziert werden können. Ein einzelner Prüfplan läuft dabei auf allen aktivierten Kanälen vollständig autark ab, die Abbruchbedingung bei Ladeschluss für jede Zelle wird zum Beispiel in der Folge individuell ausgeführt. Bei übergeordneten Maßnahmen wie etwa der Änderung der Zelltemperatur erfolgt eine zeitliche Synchronisation der Kanäle.

Einmal gestartet, kann der Prüfstand vollständig autark über Stunden, Tage oder Wochen arbeiten, wobei der aktuelle Zustand jederzeit am Prüfrechner verfolgt werden kann. Hierbei gibt es verschiedene Sicherheitsstufen, damit ein gefahrloser Betrieb ohne Beaufsichtigung gewährleistet wird. Jeder Kanal besitzt eine übergeordnete Überwachung der minimalen und maximalen Zellspannung sowie optional eine Temperaturobergrenze. Wird eine dieser Grenzen überschritten, schaltet sich der Prüfstand selbstständig ab. Zusätzlich können pro Prüfvorgang noch individuelle Grenzen vorgegeben werden. Werden diese Grenzen überschritten, wird der aktuelle Prozessschritt abgebrochen, der Prüfplan jedoch fortgesetzt.

### Zellmodule auf dem Batterie-Prüfstand

Je nach Anforderung der Batterieauslegung und -berechnung werden aus mehreren einzelnen Lithium-Ionen-Zellen Zellmodule aufgebaut, die teilweise in Reihe, teilweise parallel miteinander verschaltet sind. Aus Sicherheitsgründen wird eine Modulspannung von unter 60 Volt angesetzt, damit bei

### ZELLPRÜFSTAND

Spannungsbereich	0 ... 5 V
Strombereich 1	4 x $\pm 30$ A
Strombereich 2	2 x $\pm 60$ A
Strombereich 3	1 x $\pm 120$ A
Stromanstieg	$< 100 \mu\text{s}$
Abtastrate	5 ms
Temperaturfühler	16
Steuerung	Ethernet
Kopplung zu Thermoschrank	Ethernet

*Technische Daten des Zellprüfstandes von Porsche Engineering*

einer Berührung der Zell- und Modulanschlüsse durch die Spannung keine Gefahr für Personen entstehen kann. Die Zellmodule werden auch mit einem mechanischen Berührungsschutz versehen, sodass sie nach Beendigung des Zusammenbaus jederzeit sicher gehandhabt werden können.

Nach dem Zusammenbau wird das Zellmodul auf dem Prüfstand getestet. Dazu werden die Hochstromanschlüsse und die Signalleitungen zum eigenentwickelten Batteriemanagementsystem (BMS) mit dem Modul verbunden.

Bei einer ersten Inbetriebnahme wird zuerst die statistische Verteilung der Zellspannungen überprüft und gegebenenfalls durch gezielte Entladung einzelner Zellen auf den gleichen Spannungswert gebracht. Nun erfolgt bei geringem Strom ein kompletter Lade-/Entladezyklus, um die Gesamtkapazität und den Spannungsverlauf des Moduls zu bestimmen. Kommen hier keine Auffälligkeiten zum Vorschein, werden weitere Tests mit stetig höheren Strömen durchgeführt, bis schließlich die Maximalströme getestet werden.

Insbesondere bei Prototypen treten hier immer wieder unerwartete Ereignisse auf. Beispielsweise kann durch eine lokale Erhitzung eine schlechte Verbindung zwischen zwei Zellen angezeigt werden, die durch Produktionsfehler verursacht wurde. Vor allem die Innenwiderstandsbestimmung des Mo-

duls bei unterschiedlichen Ladezuständen (SOC) und hohen Strömen gibt hierbei ein sehr gutes Bild über die Qualität des Moduls ab. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen der laufenden Verbesserung der Modulkonstruktion und letztendlich der elektrischen und thermischen Optimierung.

### Batteriebasis- und Inbetriebnahmetests

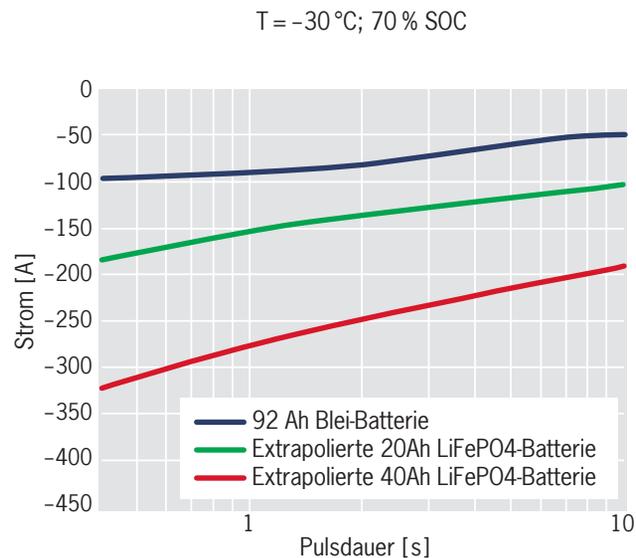
Nach Fertigstellung und Endkontrolle der Batterie mit den zuvor einzeln getesteten Modulen erfolgt zunächst die Basisinbetriebnahme der Batterie im Hochvolt-Prüflabor. Hier zeigt sich, ob unter anderem plausible Spannungs- und Temperaturwerte vom BMS gemeldet und die Schütze geschaltet werden können.

Der Isolationswächter stellt eine wichtige Sicherheitsfunktion der Batterie dar, indem er permanent den Isolationswiderstand zwischen Batterie und Chassis überwacht. Sinkt dieser Isolationswiderstand unter einen kritischen Wert, besteht die Gefahr eines elektrischen Schlags. Für den Test des Isolationswächters wird ein Prüf Widerstand zwischen dem Gehäuse der Batterie (Chassis Ground) und einem Batteriepol angeschlossen. Da der Anschluss aus sicherheitstechnischen Gründen (Berührschutz) hinter den Batterieschützen erfolgt, müssen für diesen Test die Hauptschütze geschlossen werden. Der Isolationswächter muss nach einer bestimmten Zeit den Fehler erkennen und melden. Anschließend wird in einem weiteren Test überprüft, ob der Isolationswächter einen Kabelbruch in seinem Chassis-Anschluss sicher erkennt und meldet. Bei allen Tests erfolgt stets die Aufzeichnung aller Daten am Prüfstandsrechner, um auch nachträglich sämtliche Messungen auswerten und dokumentieren zu können.

Ein weiterer Test betrifft den Interlock (Pilotlinie), der parallel zu den HV-Leitungen durch das Fahrzeug geführt wird und offene Steckverbindungen erkennt. Für diesen Test werden die Schütze geschaltet und anschließend die Interlock-Leitung am Prüfstand getrennt. Als Folge müssen sämtliche Schütze der Batterie sofort öffnen.

Ebenso ist es für den späteren Betrieb im Fahrzeug wichtig, dass die Zwischenkreiskapazität korrekt vorgeladen wird. Ein zu frühes Einschalten der Hauptschütze würde dieselben vorschädigen oder verkleben. Für diesen Test können am Prüfstand beliebige Prüfkapazitäten gemäß den Umrichterspezifikationen am Ausgang der Batterie angeschlossen werden.

Wenn alle Betriebswerte (Ladeschluss-/Entladeschlussspannung) und Grenzwerte (maximale Ströme und Kühlwassertemperatur) der Batterie in Ordnung sind, wird mit den wei-



Vergleich des maximalen Stroms einer Bleibatterie mit aus Zelldaten hochgerechneter Lithium-Ionen-Batterien bei 11 V Entladung

teren Tests begonnen, bei denen die Batterie aktiv geladen und entladen wird.

Für die Kapazitätsbestimmung der Batterie wird sie bis zur Ladeschlussspannung geladen. Hierbei zeigt sich auch, ob der Stromsensor korrekte Werte liefert und ob die Einzelzellspannungen homogen verteilt sind. An der Ladeschlussgrenze müssen die Zellen auf dieselbe Spannung gebracht werden (Balancing). Nach Abschluss des Balancingvorgangs wird die Kapazität der Batterie durch Entladen bis zur Entladeschlussspannung bestimmt.

### Elektrische Charakterisierung

Gibt es bei den Basistests keine Auffälligkeiten, werden weitere Tests gestartet, welche die Batterie charakterisieren. Ein wichtiger Leistungsparameter ist hierbei der Innenwiderstand der gesamten Batterie. Für diesen Test wird die Batterie mit einem Strompuls nach einer hinreichend langen Ruhephase beaufschlagt. Der aus dieser Messung ermittelte Innenwiderstand bestimmt die maximale Leistung und die Verlustleistung der Batterie. Auch spiegelt er die wesentlichen Alterungseffekte wider.

Am Prüfstand werden anschließend bestimmte Fahrzyklen simuliert. So ist es möglich, die Batterie mit einem realen Fahrprofil zu testen und zu qualifizieren. Dabei sorgen der vollständige Berührschutz sowie die feuerfeste Prü fzelle für maximale Sicherheit des Laborpersonals. >

## Komponententests

Die hohe Flexibilität am Prüfstand erlaubt es, einzelne Komponenten und somit auch einzelne Sicherungen oder Anschlussleitungen zu testen, um Daten für die Erstellung elektrischer und thermischer Modelle zu erhalten und die Erwärmung der Komponenten für ein bestimmtes Stromprofil zu messen.

## Softwaretests

Der Schwerpunkt der Prüfungen am Quelle-Senke-Prüfstand liegt bei den elektrischen Komponenten, wie Zellen, Hochvoltverbindungen oder Schützen, und dient prinzipiell der Verifikation der Hochvoltbatterie. Allerdings können auch BMS-Algorithmen qualitativ begutachtet werden. Die Validierung des BMS mittels „Software in the Loop“- (SIL) und „Hardware in the Loop“-Tests (HIL) ist allerdings die Voraussetzung für Softwaretests am Prüfstand.

Die Testfälle werden entweder als EXAM- oder CANoe-Skripte ausgeführt und erlauben ein hohes Automatisierungsniveau. Zu den Basistests gehört die Überwachung des zeitlichen Verlaufs der Spannung- und Temperaturmessung des BMS. Die Verteilung dieser Daten wird bei thermischen und elektrischen Profilen mittels MATLAB analysiert, fehlerhafte Kontaktierungen können dadurch lokalisiert werden. Eine erhöhte Verbindungsimpedanz führt zu thermischen Hotspots und beschleunigter Zellalterung.

Der bereits erklärte Ladezustand der Batterie ist eine wichtige Größe, sie kann mittels Ladungszähler und spannungsbasierenden Kennfeldern bestimmt werden. Die Kennfelder werden üblicherweise aus den Zelldatenblättern gewonnen und am Zellprüfstand validiert. Sie sind temperaturabhängig. Der Ladungszähler wird durch das Integral des in der Batterie eingebetteten Stromsensors berechnet. Dieser stellt zumeist einen Kompromiss zwischen Bauraum, Gewicht, Genauigkeit und Kosten dar. Der SOC der Batterie wird durch das schwächste Glied festgelegt, sprich die Zelle mit der niedrigsten Ladung.

Um die SOC-Algorithmen zu prüfen, wird ein Ladungszähler basierend auf einem Referenzstromsensor bestimmt und mit den BMS-Daten verglichen. Zusätzlich können gezielt Zellen entladen und anschließend dahingehend überprüft werden, ob das BMS den SOC adaptiert. Bei einer Batterie, die auf Lithium-Eisen-Phosphat-Zelltechnologie basiert, kann der SOC nicht immer aus einer Spannungskenlinie gewonnen werden. Hier greifen komplexere Algorithmen, die meist besondere Testfälle erfordern.

Eine wichtige Aufgabe des BMS ist die Berechnung der Leistungsfähigkeit der Batterie, was einen maßgeblichen Einfluss auf die Fahrperformance hat. Zur Prüfung wird die Batterie in beiden Quadranten (Laden und Entladen) mit den vom BMS freigegebenen Strömen belastet. Die Änderungen der Stromgrenzen werden überwacht und mit den Anforderungen abgeglichen.

Die Tests am Prüfstand bilden einen wichtigen Baustein im Rahmen der Qualifizierung. Sie liefern auch wichtige Messdaten, um neue SIL-Vektoren für die BMS-Entwicklung zu generieren, welche den Vorteil haben, dass sie stets reproduzierbar sind.

## Thermische Tests

Der Thermoprüfstand ist direkt mit dem Batterieprüfstand gekoppelt, wodurch sich sehr flexible Testmöglichkeiten ergeben. Die Abwärme einer Batterie mit 300 kW Traktionsleistung liegt aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrads, abhängig von Innenwiderstand und Strom, bei ca. 6 kW. Sie wird über ein Kühlmedium an die Umgebung abgegeben.

Zur thermischen Charakterisierung von Batterien werden bei Porsche Engineering verschiedene Tests durchgeführt. Dabei werden auf Zell-, Modul- oder Batterieebene je nach Kühlsystem und Entwicklungsstand unterschiedliche Messgrößen aufgenommen. In einem Modul können zur genauen Charakterisierung bis zu 40 Thermoelemente verbaut werden, um thermische Pfade aufzuzeigen. Eine weitere wichtige Messgröße ist der Massenstrom des Kühlmediums, aus dem sich zusammen mit der Eintritts- und Austrittstemperatur des Kühlmediums die Kühlleistung berechnen lässt. Über den Innenwiderstand der Lithium-Ionen-Zellen kann die Abwärme der Batterie bestimmt werden.

Zu den thermischen Inbetriebnahmetests gehört auch der Stresstest. Hierbei wird die Batterie mit einem Stromprofil so lange belastet, bis diese das thermische Gleichgewicht erreicht hat. Dies ist dann der Fall, wenn die Abwärme der Batterie exakt die Kühlleistung des Kühlsystems beträgt. In diesem Zustand wird der thermische Widerstand berechnet, welcher die Kühlleistungsfähigkeit der Batterie bestimmt.

Außerdem wird die Batterie je nach Lastenheftanforderung mit dynamischen Fahrzyklen belastet. Hierbei wird eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung sowohl innerhalb einer Einzelzelle als auch innerhalb des Gesamtbatteriesystems abgeprüft. Darüber hinaus werden die zulässigen Betriebstemperaturen ermittelt, bei welchen das System die



## PORSCHE CAYENNE S E-HYBRID



*Bei einem Hybridfahrzeug wie beispielsweise dem Porsche Cayenne S E-Hybrid ist ein optimales Batteriemangement von besonderer Bedeutung.*

Der Cayenne S E-Hybrid ist der erste Plug-in-Hybrid im Premium-SUV-Segment. Der technische Fortschritt im Vergleich zum bisherigen Cayenne S Hybrid ist immens: Er hat eine Lithium-Ionen-Antriebsbatterie mit einer Kapazität von jetzt 10,8 kWh, die je nach Fahrweise und Topografie ein rein elektrisches Fahren über 18 bis 36 Kilometer ermöglicht. Die Leistung der Elektromaschine hat sich mehr als verdoppelt, von 34 kW (47 PS) auf 70 kW (95 PS). Der Gesamtverbrauch (kombiniert) beträgt jetzt 3,4 l/100 km (CO<sub>2</sub>-Emission (kombiniert) 79 g/km; Stromverbrauch (kombiniert) 20,8 kWh/100 km). Die kombinierte Leistung des Dreiliter-V6-Kompressormotors (245 kW/333 PS) und der Elektromaschine von insgesamt 306 kW (416 PS) bei 5500/min sowie ein Gesamtdrehmoment von 590 Newtonmetern bei 1250 bis 4000/min ermöglichen Fahrleistungen auf Sportwagenniveau: null auf 100 km/h in 5,9 Sekunden und eine Höchstgeschwindigkeit von 243 km/h. Die elektrische Höchstgeschwindigkeit beträgt 125 km/h. Die Antriebsbatterie kann über das Stromnetz oder während der Fahrt geladen werden.

geforderte Leistung frei von Sicherheits- oder Haltbarkeitsbedenken zur Verfügung stellen kann. Typische Fahrzyklen sind zum Beispiel der Artemis-Zyklus (CADC 150), Autobahnzyklen und diverse Rennprofile.

Aufgrund dessen, dass nahezu alle Batterien, die am Prüfstand getestet werden, auch von Grund auf bei Porsche Engineering entwickelt und gefertigt worden sind, verfügen die Ingenieurinnen und Ingenieure über ein ausgeprägtes Verständnis bei der exakten Ausstattung mit Temperaturmessstellen.

### Fazit

Mittels der beschriebenen Vorgehensweise und Testverfahren werden sowohl alle Batteriebestandteile einzeln als auch im

Zusammenspiel überprüft. Die Funktionalität und insbesondere auch die Sicherheit aller Batterien ist damit während der Anwendung gewährleistet. ■

---

**CAYENNE S E-HYBRID:** Kraftstoffverbrauch (kombiniert) 3,4 l/100 km; Stromverbrauch (kombiniert) 20,8 kWh/100 km; CO<sub>2</sub>-Emission (kombiniert) 79 g/km; Effizienzklasse A+

---

## IMPRESSUM

# Porsche Engineering

MAGAZIN

AUSGABE 2/2014



## HERAUSGEBER

Porsche Engineering Group GmbH  
Porschestraße 911  
71287 Weissach  
Tel. +49 711 911 0  
Fax +49 711 911 8 89 99  
Internet: [www.porsche-engineering.de](http://www.porsche-engineering.de)

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers. Für die Rücksendung unverlangt eingegangener Fotos, Dias, Filme oder Manuskripte kann keine Gewähr übernommen werden. Porsche Engineering ist eine 100%ige Tochtergesellschaft der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

## REDAKTIONSLEITUNG

Frederic Damköhler

## REDAKTION | KOORDINATION

Nadine Guhl

## ANZEIGEN

Frederic Damköhler

## GRAFISCHE GESTALTUNG

VISCHER&BERNET, Stuttgart

## ÜBERSETZUNG

RWS Group GmbH, Berlin

## GESAMTHERSTELLUNG

Kraft Druck GmbH  
76275 Ettlingen



---

[www.porsche-engineering.de](http://www.porsche-engineering.de)



[www.porsche-nardo.com](http://www.porsche-nardo.com)

**Damit aus Leistung eine runde Sache wird,  
muss man sie genauso testen.**

**Nardò Technical Center.**



**PORSCHE**



[www.porsche-consulting.com](http://www.porsche-consulting.com)

**Warum sollte man Kunden nur zufriedenstellen,  
wenn man sie auch begeistern kann.**

**Porsche Consulting.**



**PORSCHE**