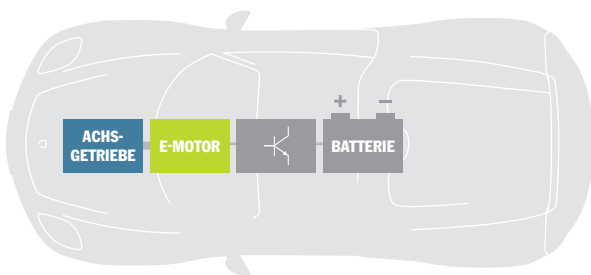


# IDENTIFIZIERT

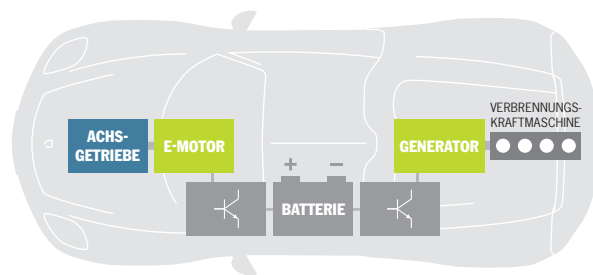
## E-Maschinen – das Herz des elektrischen Antriebsstrangs

Bei der Betrachtung zukünftiger Antriebstechnologien spielt die Elektromobilität eine entscheidende Rolle: Nach und nach verlässt sie ihr Nischendasein und wird erfahrbare Realität – eine Herausforderung für etablierte Automobilhersteller. Die damit einhergehenden Veränderungen in der Automobilentwicklung erfordern den Umgang mit oftmals ungewohnten Technologien. Mit diesem Artikel stellen wir die theoretischen Grundlagen von E-Maschinen sowie deren Relevanz für die Funktionsweise zukünftiger Antriebssysteme vor.

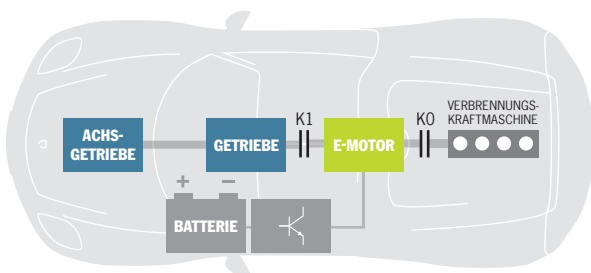
Text: Dr. Malte Jaensch



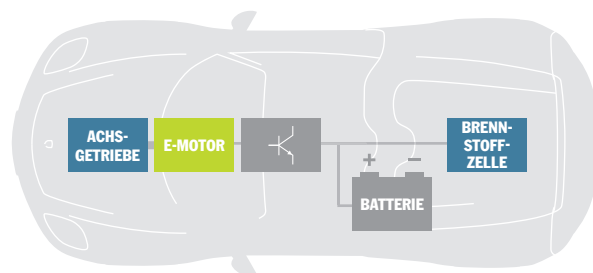
BATTERIEELEKTRISCHES FAHRZEUG



SERIELLES HYBRIDFAHRZEUG



PARALLELES HYBRIDFAHRZEUG



BRENNSTOFFZELLEN-FAHRZEUG

Vor über 150 Jahren setzte James Clerk Maxwell mit der Formulierung seiner nach ihm benannten Gleichungen (siehe unten) einen Meilenstein in der Entwicklung elektrischer Maschinen. Diese Gleichungen spiegeln ein trügerisches Bild von Simplizität wider. Eine Maschine mit nur einem bewegten Teil, dem Rotor, beschrieben mit einigen kurzen Gleichungen, scheint überschaubar einfach. Bei näherer Betrachtung erweisen sich elektrische Maschinen jedoch als überraschend komplex und vielschichtig.

### Arbeitsweise

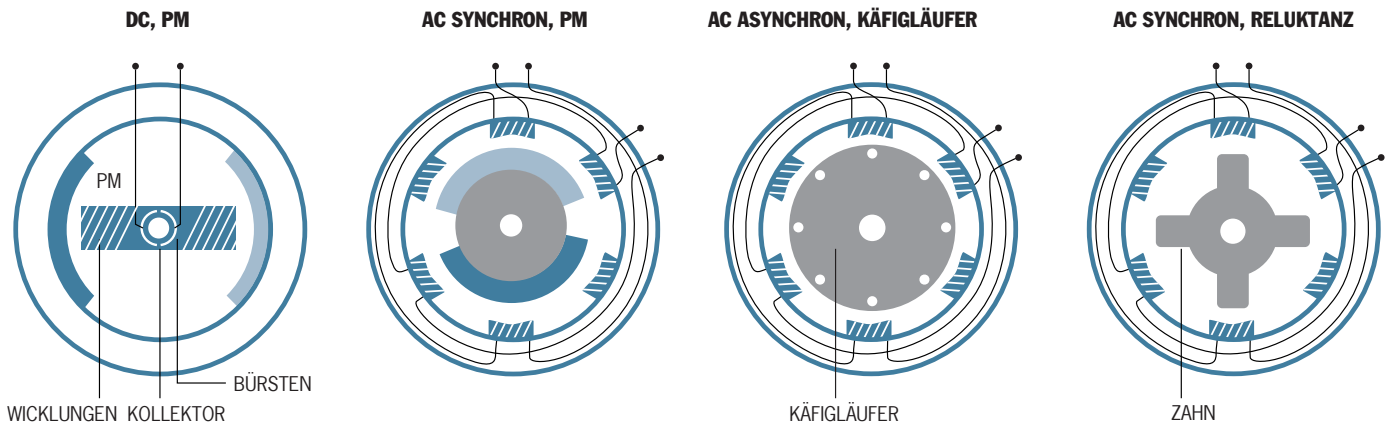
In einem E-Fahrzeug sind E-Motoren stets Teil eines größeren Systems, des elektrischen Antriebsstranges. Batterieelektrische Fahrzeuge haben den einfachsten

Antriebsstrang: eine Hochvolt-Batterie liefert DC-Leistung, also Gleichstrom, welche von einem Frequenzumrichter in dreiphasige AC-Leistung, das heißt Wechselstrom, umgewandelt wird. Der E-Motor konvertiert diese elektrische Leistung nun in mechanische Leistung, also Drehmoment und Drehzahl. Dagegen weisen Hybrid- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge oft erheblich komplexere Topologien auf (Abbildung linke Seite).

Die meisten elektrischen Maschinen nutzen die Interaktion zweier elektromagnetischer Felder, um Drehmoment zu erzeugen. Hierbei wird mindestens eines der beiden Felder durch den vom Umrichter gespeisten elektrischen Strom aufgebaut. Das andere Feld kann je nach Motorentyp durch Permanentmagnete (PM), induzierte Ströme oder

- $E$  ELEKTRISCHES FELD
- $\rho$  LADUNGSDICHTE
- $\epsilon_0$  VAKUUMPERMITTIVITÄT
- $B$  FLUSSDICHTE
- $\mu_0$  VAKUUMPERMEABILITÄT
- $t$  ZEIT
- $J$  STROMDICHTE

Gaußsches Gesetz	$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Beschreibt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Feld und der Ladung
Gaußsches Gesetz für Magnetfelder	$\nabla \cdot B = 0$	Magnetische Feldlinien haben keinen Anfang und kein Ende, es gibt keine Monopole
Faradaysches Induktionsgesetz	$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}$	Wechselnde Magnetfelder können Spannung induzieren, wie im E-Generator
Ampèresches Gesetz	$\nabla \times B = \mu_0 J$	Elektrische Ströme können Magnetfelder erzeugen, wie im E-Motor



*Funktionsprinzip eines E-Motors*

eine zweite Stromquelle erzeugt werden (siehe Abbildung oben).

Eine der nützlichsten Eigenschaften elektrischer Maschinen ist, dass die Leistungsumwandlung reversibel verläuft. Als Generator verwendet, wandelt eine E-Maschine mechanische Leistung in elektrische Leistung, als Motor elektrische Leistung in mechanische. Diese Eigenschaft wird zum Beispiel beim rekuperierenden Bremsen ausgenutzt, um die kinetische Energie des Fahrzeugs zurück in die Batterie zu speisen.

**Überlast**

Im Gegensatz zum konventionellen Verbrennungsmotor ist die Leistungsabgabe von E-Motoren stark situationsabhängig. So kann der E-Motor kurzzeitig überladen werden und sehr hohe Leistungen bereitstellen. Somit wird eine erste Unter-

scheidung zwischen „S1“-Dauerleistung und kurzzeitiger Spitzenleistung erforderlich.

In bestimmten Fahrsituationen, wie zum Beispiel bergauf oder bei hoher Geschwindigkeit, ist Dauerleistung gefragt. In anderen Fahrzuständen, wie dem Erklimmen eines Bordsteins oder beim Überholen, ist Spitzenleistung wichtig. Je nach Maschinentyp kann die Spitzenleistung dem bis zu Fünffachen der Dauerleistung entsprechen. Dieser „turboboost“ trägt maßgeblich zum ungewöhnlichen Fahrverhalten von E-Fahrzeugen bei.

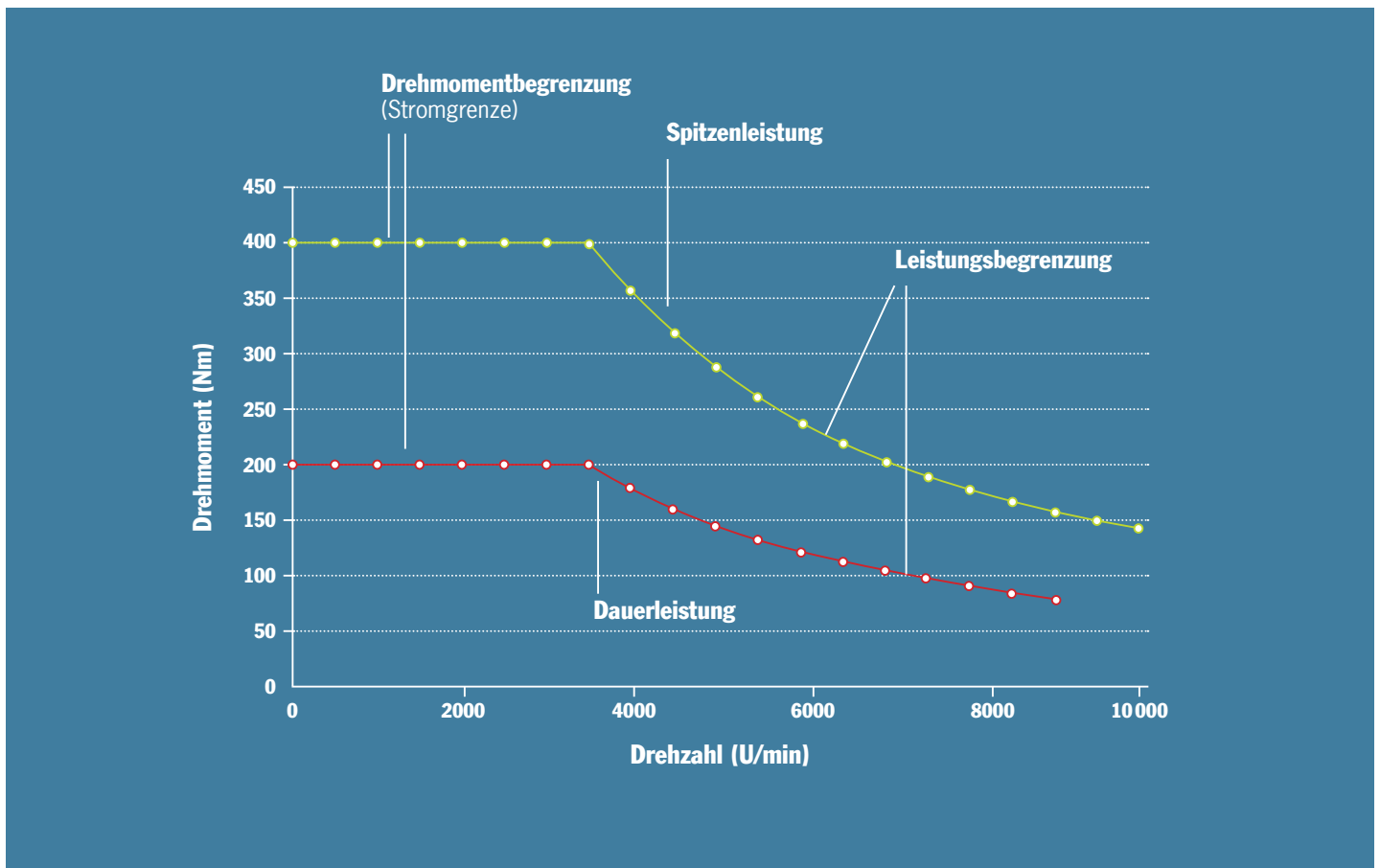
Unter Überlast steigt die Temperatur der stromführenden Kupferleitungen im E-Motor rapide an. Rechtzeitig vor dem Erreichen der Grenztemperatur muss die Leistung verringert werden, um die Maschine nicht zu beschädigen. Abgesehen von dieser zeitlichen Dimension beein-

flussen noch weitere Faktoren wie Batteriespannung und Kühlmitteltemperatur das Überlastverhalten der Maschine. Diese vieldimensionale Leistungscharakteristik widersetzt sich unweigerlich der einfachen Darstellung, sei es auf einem Datenblatt oder als Teil eines Simulationsmodells.

**Drehmoment-Drehzahl-Kurven**

Wie bei Verbrennungskraftmaschinen (VKM) erweisen sich Drehmoment-Drehzahl-Kurven als nützliche Werkzeuge bei der Beschreibung des Verhaltens von E-Motoren (siehe Schaubild rechts oben). Die Drehmoment-Drehzahl-Kurven elektrischer Maschinen teilen typischerweise folgendes Merkmal:

Bis zu einer gewissen Drehzahl, der Eckdrehzahl, ist das Drehmoment in etwa konstant und die Leistung steigt linear.



Drehmoment-Drehzahl-Kurve

Jenseits der Eckdrehzahl nimmt das Drehmoment ab und die Leistung ist in etwa konstant. In diesem Bereich konstanter Leistung darf die Klemmenspannung des Motors nicht weiter linear mit der Drehzahl ansteigen, sie wird „künstlich“ niedrig gehalten. Das erfolgt durch eine bewusste Schwächung eines der beiden elektromagnetischen Felder innerhalb der Maschine. Diese Feldschwächung kann durch eine Phasenverschiebung des vom Umrichter gespeisten AC-Stromes erzeugt werden. Als Konsequenz daraus produziert ein Teil des Stromes dann jedoch kein Drehmoment mehr und das Drehmoment nimmt ab.

Die ersichtlich werdende Komplexität impliziert auch zunehmend hohe Anforderungen an die Vermessung, Validierung und Zertifizierung von E-Motoren. Durch den 250-kW-E-Maschinenprüfstand (siehe hierzu auch den Artikel „Elektrifiziert“ ab Seite 22) überprüft

Porsche Engineering E-Maschinen im Kundenauftrag.

### Grenzbedingungen (Limits)

Die momentan bereitstehende Leistung wird von einer Reihe Faktoren begrenzt: Die Temperatur des Strom führenden Kupferdrahtes ist durch die notwendige Beschichtung mit isolierenden Lacken auf typischerweise 140 bis 200 °C begrenzt. Da die Temperatur stark mit dem Strom korreliert, wirkt sich so die Kupfertemperatur auf den maximal möglichen Eingangsstrom aus.

Wenn Permanentmagnete Verwendung finden, wie es bei den meisten Fahrzeugantrieben der Fall ist, ergeben sich weitere Limitationen für die darstellbare Leistung des E-Motors. Moderne Neodym-Eisen-Bor-Magnete haben eine Temperaturfestigkeit von bis zu 220 °C. Wenn

diese Grenze überschritten wird, können die Magnete unter Umständen sehr schnell demagnetisiert werden, irreversible Leistungseinbußen sind die Folge. Magneterwärmung ist ein komplexes, schwer verständliches Phänomen, beeinflusst unter anderem von Drehzahl, Batteriespannung und der Höhe und spektralen Zusammensetzung des vom Umrichter erzeugten AC-Stromes.

Da Magneterwärmung nicht nur schwer zu beschreiben, sondern auch schwer zu messen ist, sind entsprechende Modelle oft komplex und dennoch unscharf. Es ergibt sich, dass es hochintegrierter Simulationsmodelle bedarf, um das Verhalten des elektrischen Antriebssystems innerhalb des Fahrzeugsystems abbilden zu können, wie im nächsten Beitrag („Optimiert“) beschrieben.

Zusätzlich zu den besprochenen thermischen Grenzbedingungen existieren >

die allgemeinen gültigen Grenzen für rotierende Maschinen. So wird die maximale Drehzahl durch die mechanische Festigkeit des Rotors und die verwendeten Wälzlager begrenzt. Zu jeder Zeit ist die verfügbare Motorleistung auf das begrenzt, was die Batterie und der Umrichter liefern können, abzüglich im Motor auftretender Verluste.

### **(A)Synchron**

Von der großen Anzahl verschiedenster E-Motoren-Typen, die am Markt existieren, werden nur sehr wenige als Antriebsmaschinen im Automobilbau verwendet. Sehr häufig eingesetzt werden permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PSM). Das Wort synchron beschreibt hier die Eigenschaft, dass der Rotor sich mit dem vom eingespeisten Strom erzeugten elektromagnetischen Feld mitdreht. Maschinen dieses Typs weisen relativ hohe spezifische Drehmomente und Leistungen sowie eine hohe Effizienz auf.

Der Rotor einer PSM kann entweder außerhalb oder innerhalb des Stators angeordnet sein. Ein Beispiel für eine Maschine mit internem Rotor ist die Vorderachs-Antriebsmaschine des 918 Spyder (siehe Seite 28). PSM mit externem Rotor haben durch den größeren Hebelarm ein erhöhtes spezifisches Drehmoment, sodass sie kürzer gebaut werden können. Maschinen dieser Art werden bei Parallelhybriden oft als integrierte Einheiten zwischen VKM und Getriebe gesetzt, wie zum Beispiel bei dem neuen Panamera S E-Hybrid.

Im Gegensatz zu PSM haben Asynchronmaschinen (ASM) keine Permanentmagnete auf dem Rotor. Drehmoment wird erzeugt durch die Reaktion zwischen dem elektromagnetischen Feld des Stators, hervorgerufen von dem eingespeisten AC-Strom, und einem durch Induktion erzeugten Rotorfeld. Rotor und Statorfeld drehen nicht mit der gleichen Drehzahl, daher der Zusatz „asynchron“.

Denn gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz kann das Rotorfeld nur induziert werden, wenn es relative Bewegung, also Schlupf, zwischen Statorfeld und Rotor gibt.

ASM werden als sehr robust und kostengünstig angesehen, besonders im Vergleich zu PSM, welche aufgrund der für die Magnete benötigten seltenen Erden hohe Produktionskosten aufweisen. Leider sind bei vergleichbarer Leistung ASM generell ineffizienter und erheblich schwerer als PSM.

### **Fazit**

Hochleistungselektromotoren für moderne elektrische Fahrzeugantriebe sind hochkomplexe mechatronische Systeme,

trotz ihres scheinbar einfachen Aufbaus und ihrer eleganten mathematischen Beschreibung. Ein Verständnis der elektromagnetischen, thermischen und mechanisch-physikalischen Vorgänge im E-Motor ist somit essenziell für eine optimale Integration in jedes Antriebs- und Fahrzeugsystem.

Von den zahlreichen Elektromotorenherstellern werden verschiedenste Motorentypen und Bauformen angeboten, mit idiosynkratischen Vor- und Nachteilen. Die anforderungsgerechte Auswahl, Konfigurierung und Parametrierung einer E-Maschine erfordert den koordinierten Einsatz von Computermodellen und Messungen am Maschinenprüfstand.

Die zunehmende politische und wirtschaftliche Bedeutung der elektrischen

## **Hybrid-Antriebssystem im Panamera S E-Hybrid**

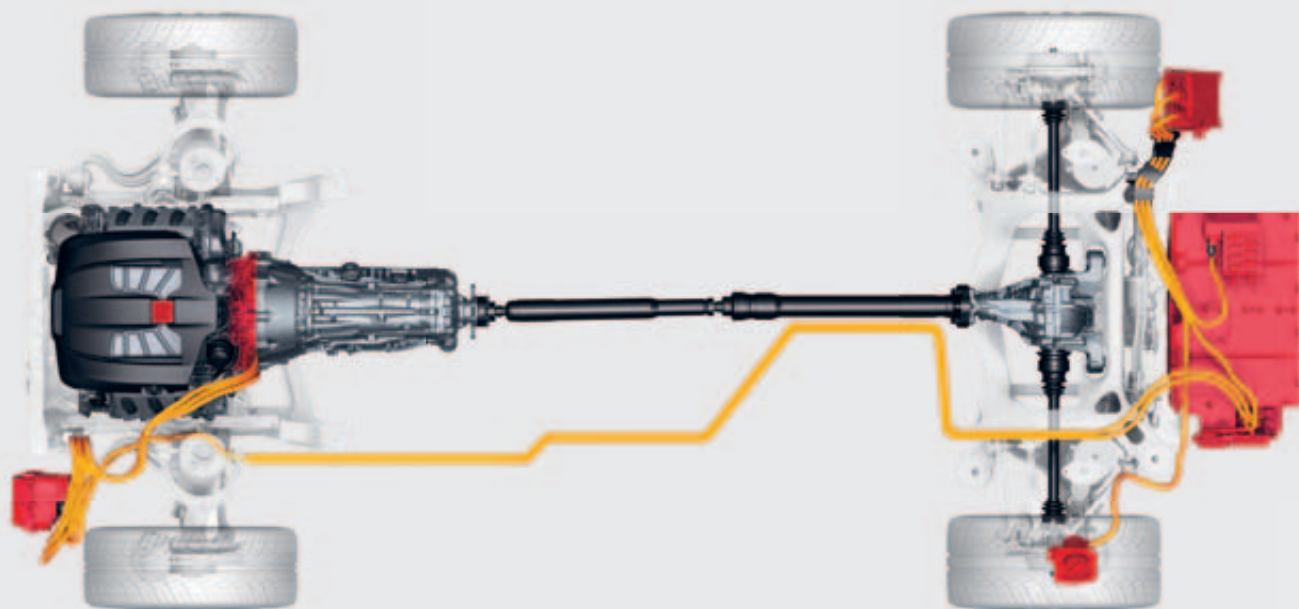
Das nahtlose Zusammenspiel von Verbrennungsmotor und Elektromotor bildet ein Antriebskonzept, das hohe Performance mit hoher Effizienz vereint. Die neue Lithium-Ionen-Batterie kann am externen Stromnetz über den Fahrzeugladeanschluss geladen werden. Der leistungs- und drehmomentstarke Elektroantrieb stellt eine adäquate elektrische Performance sicher. Die Motoren sind weiterhin mechanisch direkt mit den Achsen verbunden, sodass die Porsche-typische Leistung jederzeit abgerufen werden kann: über den Verbrennungsmotor oder besonders sportlich gemeinsam über beide Antriebe – das sogenannte Boosten.

Mobilität zwingt die etablierten Automobilhersteller, zeitnah neue Produkte zu entwickeln für einen wirtschaftlich und technologisch anspruchsvollen sowie sehr dynamischen Markt. Porsche Engineering steht bereit, die entstehenden Herausforderungen anzunehmen und zusammen mit unseren Kunden die Technologien der Zukunft zu bewegen. ■



*Der Panamera S E-Hybrid: zukunftsorientiert*

**PANAMERA S E-HYBRID:** Kraftstoffverbrauch (in l/100 km) kombiniert 3,1; CO<sub>2</sub>-Emissionen 71 g/km; Stromverbrauch 16,2 kWh/100 km; Effizienzklasse DE/CH A+/A



*Hybrid-Antriebssystem im Panamera S E-Hybrid*