

# OPTIMIERT

## Konzeption und Auslegung des optimalen elektrischen Antriebs

Die effektive Gestaltung von elektrischen Antriebssträngen steht heute mehr denn je im Fokus bei der Fahrzeugentwicklung. Porsche Engineering beschäftigt sich deshalb unter anderem mit umfassenden Simulationen in vielen Bereichen der Elektromobilität.

*Text: Adam Barák, Thorsten Böger, Torsten Dünninghaus, Thomas Sadorf*

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb ist die Konzeption und Auslegung des Antriebsstranges eine zentrale Aufgabe. Hierbei gilt es, die Anforderungen aus dem Lastenheft fest im Fokus zu behalten und gleichzeitig die Komponenten E-Maschine, Leistungselektronik, Traktionsbatterie und Getriebe ideal aufeinander abzustimmen.

Die zur Diskussion stehenden Fahrzeugkonzepte werden häufig von externen Randbedingungen stark eingeschränkt. So lässt der zur Verfügung stehende Bauraum beispielsweise nur eine bestimmte Motor-Getriebe-Kombination zu, Achsabstände limitieren maximale Gangübersetzungen und der Einsatz von mehrstufigen Getrieben und Kupplungen ist nicht möglich.

Ein weiterer limitierender Faktor sind die späteren Produktionskosten, die möglicherweise von vornherein dem Einsatz wirkungsgradoptimaler PSM-Konzepte (permanent erregte Synchronmotoren) entgegenstehen. Auch Konzepte mit mehreren Gängen, Kupplungen oder mehreren Motoren können so von vornherein ausscheiden. Nicht zu vergessen sei an dieser Stelle auch der Zeitfaktor, denn bei Projekten mit hohem Innovationsgrad spielt die zur Verfügung stehende Zeit eine wichtige Rolle. All dies führt zu der Frage, in welcher Weise die vorhandenen Ressourcen eingesetzt werden müssen, um den bestmöglichen Antrieb ins Fahrzeug zu bringen.

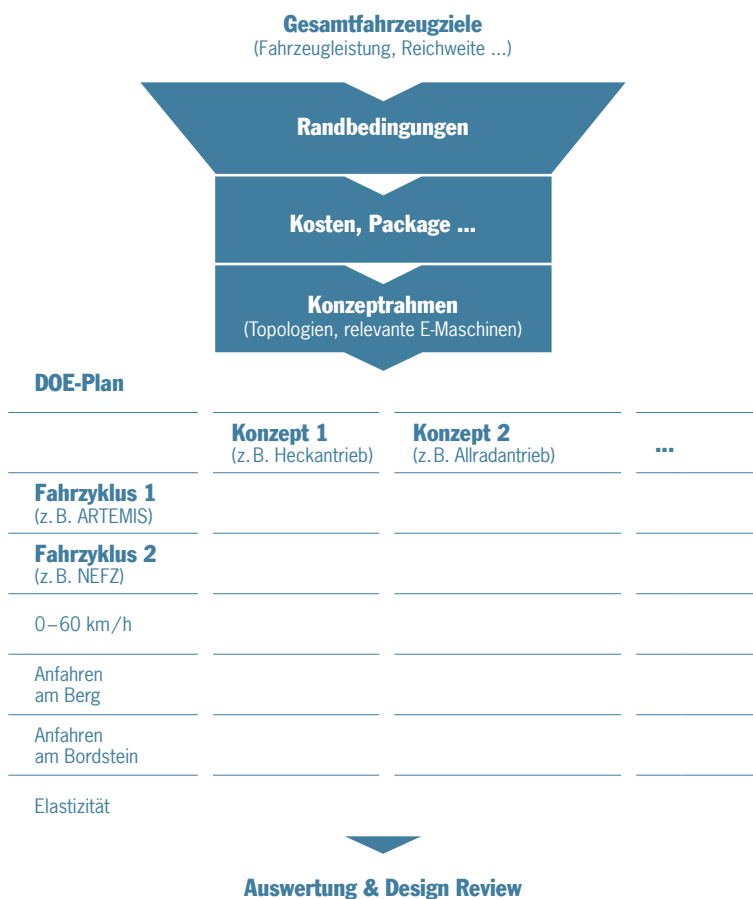
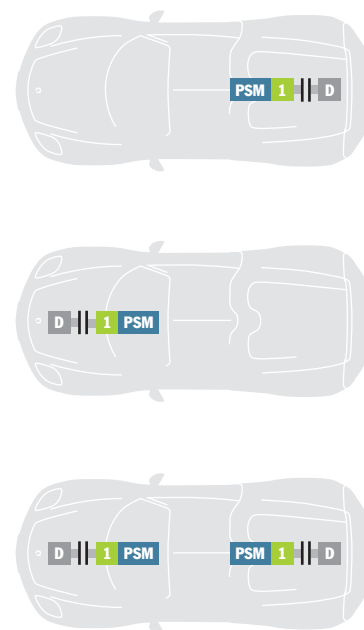
Neben projektspezifischen Randbedingungen in Bezug auf Package und Budget stehen vor allem Ziele an die Fahrleis-

tungen, den Verbrauch und die Reichweite an erster Stelle. Die wichtigsten Manöver, um die Fahrleistung zu bestimmen, sind die Vollastbeschleunigung von null bis 100 km/h und das Anfahren am Berg und am Bordstein. Die Auslegung für den Verbrauch und die Reichweite richtet sich nach zielmarktspezifischen Randbedingungen, gesetzlichen Vorgaben (in der EU zum Beispiel der Neue Europäische Fahrzyklus – NEFZ) und den Kundenanforderungen an das Fahrzeug wie beispielsweise die Ermittlung eines kundennahen Verbrauchs im CADC (Common Artemis Driving Cycles).

### Definition der Topologie

Zu Beginn der Entwicklung muss zuerst einmal die Zieltopologie des Fahrzeugs festgelegt werden. Dies ist eine sehr komplexe Aufgabe, das Ergebnis ist stark abhängig vom Fahrzeugtyp und von den technischen Erwartungen an das Fahrzeug. Es gibt eine beliebig große Anzahl von möglichen Anordnungen und Kombinationen der Antriebskomponenten, die jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile haben. >

### Beispiele für verschiedene Topologien





### eCruise

Ein bei Porsche Engineering eigens entwickeltes Berechnungsprogramm für schnelle Vorauslegungen, basierend auf Microsoft Excel

### AVL Cruise

Gesamtfahrzeugsimulation zur Bestimmung von Fahrleistung und Verbrauch

### Matlab/Simulink

Fahrleistungs- und Verbrauchssimulation in Kombination mit komplexen Subsystemmodellen und Regelsystemen

Eine mögliche Variante ist eine Topologie mit einer E-Maschine an der Vorderachse und einer zweiten an der Hinterachse. Sie bietet sowohl beim Antreiben die Vorteile eines Allradantriebs als auch bei der Fahrstabilität das höchste Potenzial zum regenerativen Bremsen. In dieser Topologie könnten zum Beispiel unterschiedliche Motortypen kombiniert werden. Ein Motor mit idealem Wirkungsgrad würde einen Großteil des Fahrbetriebs abdecken, während ein günstigerer und vom Wirkungsgrad her nicht idealer Motor den geforderten Spitzenleistungen gerecht wird. So könnten zum Beispiel die Kosten gesenkt werden mit minimalem Einfluss auf den Verbrauch.

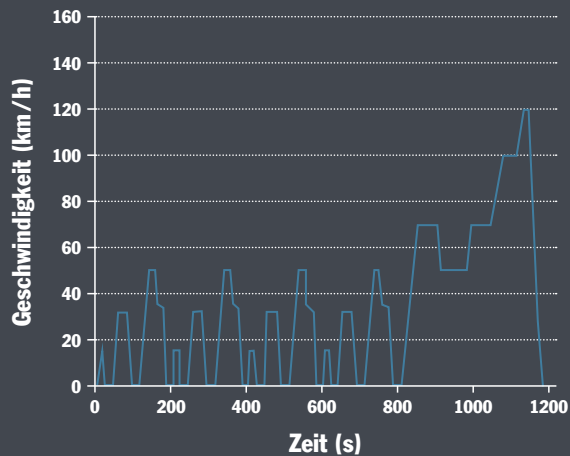
Einer der ersten Schritte ist es, die Randbedingungen aus dem Projektsteckbrief in technische Eigenschaften umzusetzen. Hierbei ist es entscheidend, die Wechselwirkungen der Systemkomponenten zu berücksichtigen. Dazu folgendes Beispiel: Dem Wunsch nach einer großen Reichweite könnte durch eine ausreichend große Traktionsbatterie Rechnung getragen werden. Durch das hohe Gewicht der Batterie wird jedoch das Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs reduziert. Die Kosten der größeren Batterie, das Package und der höhere Energieverbrauch stehen hier vielen anderen Randbedingungen kontrovers gegenüber.

### Fahrleistungs- und Verbrauchssimulation

Zur Ideenfindung und der anschließenden Auswahl geeigneter Konzepte dienen bekannte Werkzeuge wie beispielsweise der morphologische Kasten und die Entscheidungsmatrix. Die Fahrleistungs- und Verbrauchssimulation trägt hier beträchtlich dazu bei, im Vorfeld die Potenziale verschiedener Konzepte auszuloten und miteinander zu vergleichen. Die Bandbreite der infrage kommenden Konzepte und die zur Auswahl stehenden Komponenten werden hierbei bereits eingeschränkt. Um die verbleibenden relevanten Antriebsstrangkonzepte beurteilen zu können, werden die Modelle nun weiter detailliert. In einem DOE-Plan (Design of Experiment) werden die Konzepte und die erforderlichen Berechnungen zusammengetragen. Liegen die Ergebnisse vor, können die einzelnen Konzepte im Detail verglichen und bewertet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse und festgestellten Tendenzen erlauben eine feinere Granulierung der Konzepte, um so die optimale Auslegung des Antriebsstranges zu bestimmen.

Bei Porsche Engineering stehen für diese Aufgabe die Programme Matlab/Simulink, AVL Cruise und eCruise zur Verfügung. Bei eCruise handelt es sich um ein inhouse entwickeltes Berechnungsprogramm zum in der Konzeptphase einfa-

## Neuer Europäischer Fahrzyklus – NEFZ

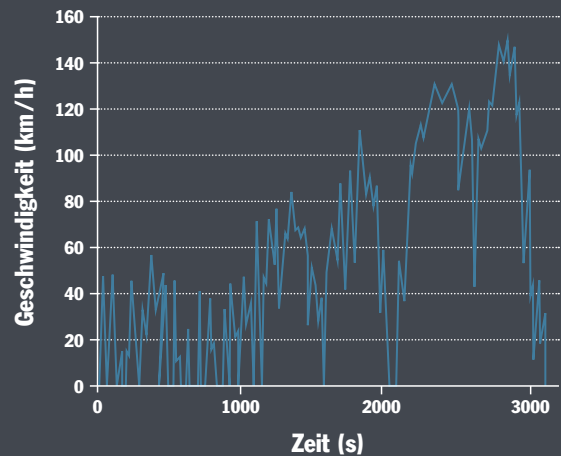


Der NEFZ ist der gesetzlich vorgeschriebene Fahrzyklus in Europa und China bei der Ermittlung von Verbrauchswerten. Er besteht aus Konstantfahrten, konstanten Beschleunigungen, Verzögerungen und Standphasen.

Maximalgeschwindigkeit	120,0 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit	33,6 km/h
Standzeit	20,0%
Länge	11 km
Maximalbeschleunigung	1,0 m/s <sup>2</sup>
Maximalverzögerung	-1,4 m/s <sup>2</sup>

Beschreibung NEFZ

## Common ARTEMIS Driving Cycles – CADC



Der CADC ist im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes ARTEMIS entstanden. Er leitet sich aus realen Fahrprofilen ab.

Maximalgeschwindigkeit	150,4 km/h
Durchschnittsgeschwindigkeit	59,2 km/h
Standzeit	9,7%
Länge	51,7 km
Maximalbeschleunigung	2,3 m/s <sup>2</sup>
Maximalverzögerung	-3,6 m/s <sup>2</sup>

Beschreibung CADC

chen und schnellen Quantifizieren der Verbräuche und Fahrleistungen.

### Definition der Motorgroße

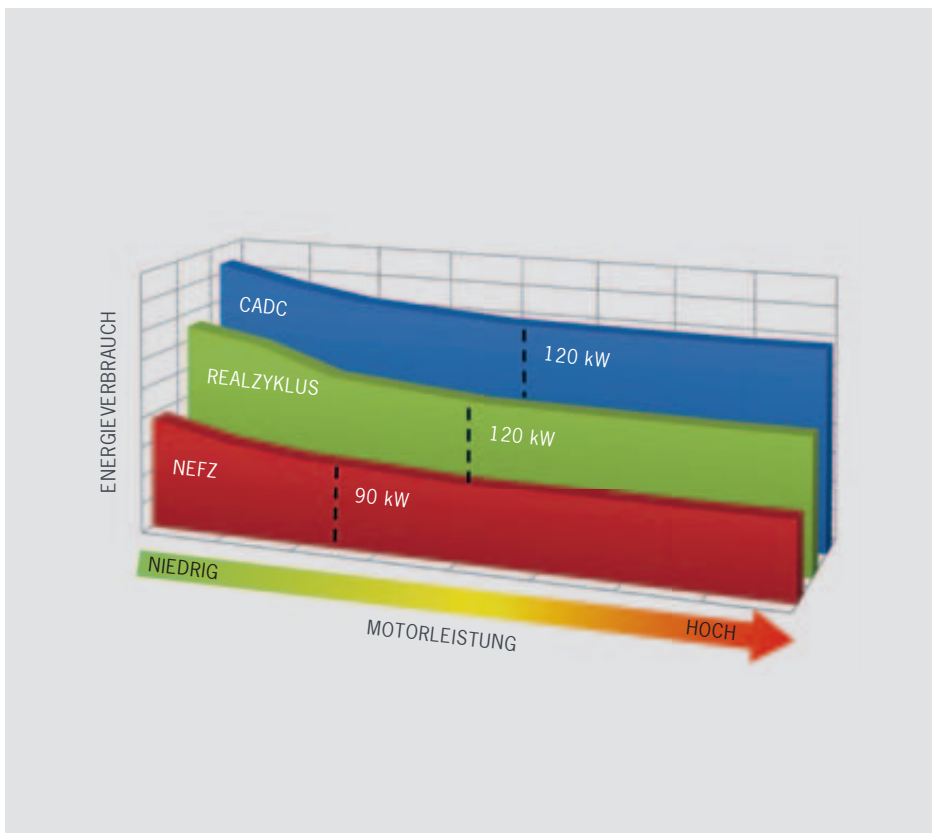
Ist die Topologie festgelegt, gilt es, die Größe und Art der E-Maschine bzw. der E-Maschinen zu definieren. Abhängig von den geforderten Fahrleistungen,

den angesetzten Bewertungszyklen und den dort auftretenden Motorbetriebspunkten wird die minimal notwendige Antriebsleistung bestimmt.

Im NEFZ wird zum Beispiel aufgrund der geringen Dynamik mit konstanten Beschleunigungen, Verzögerungen von max. 1,4 m/s<sup>2</sup>, eine Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h und den vielen

Konstantfahrten weniger Antriebsleistung benötigt und insgesamt verhältnismäßig wenig Energie verbraucht. Dadurch wird der Motor im Zyklus häufig im niedrigen Leistungsbereich betrieben. E-Maschinen mit hoher Effizienz bei geringen Leistungen sind hier vorteilhaft.

Im Vergleich dazu hat ein dynamischer Zyklus wie der CADC höhere >



Einfluss der Motorgröße auf den Energieverbrauch in den verschiedenen Fahrzyklen

Beschleunigungen und Verzögerungen von maximal  $3,6 \text{ m/s}^2$ . Darüber hinaus liegt die Maximalgeschwindigkeit bei  $150 \text{ km/h}$  und es gibt kaum Anteile mit Konstantfahrten. Aufgrund dessen wird ein größerer Leistungsbereich der E-Maschine beansprucht.

Für einen niedrigen Zyklusverbrauch muss der Wirkungsgrad in einem weiten Bereich des Kennfelds hoch sein. Zudem wird in einem dynamischen Zyklus nicht nur kurzzeitig eine höhere Leistung verlangt (Rekuperationsbremsung), sondern über längere Phasen. Hat der Motor zu wenig Leistung, kann beim Bremsen nicht die volle Energie zurückgewonnen werden und der Motor wird früher thermisch überlastet. Die Motorsteuerung geht dann in den Derating-Betrieb. Für eine definierte Abkühlphase steht jetzt nur eine reduzierte Motorleistung zur Verfügung. Je größer die thermische Masse des Motors und je höher die Leistung, desto seltener kommt ein Fahrzeug in den Abregelbereich. Auch

dies spricht für eine Motormindestgröße bei der Auslegung eines ernst zu nehmenden elektrischen Antriebs.

### Einfluss des regenerativen Bremsens

Größere Motoren in Kombination mit angemessenen Getriebeübersetzungen bieten zusätzliche Vorteile während des regenerativen Bremsens (Rekuperation). Bei einem konventionellen Fahrzeug wird hierbei die Bewegungsenergie über die Reibbremse in Wärme umgewandelt und ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Elektrofahrzeuge können einen großen Teil der Bewegungsenergie zurückgewinnen: Beim Bremsen schaltet der Elektromotor in den Generatorbetrieb, wandelt die Bewegungsenergie in elektrische Energie um und speichert diese in die Hochvolt-Batterie zurück.

Die Menge der Bremsenergie, die zurückgewonnen werden kann, hängt in erster Linie von der Motorleistung, der

Getriebeübersetzung und von der Rekuperationsfähigkeit des Bremsenmanagements ab. Da beispielsweise beim Bremsen in der Kurve die Traktion an der Hinterachse früh limitiert wird, ist es vorteilhaft, die elektrische Bremskraft zwischen der Vorder- und Hinterachse zu verteilen, um das maximale Potenzial der regenerativen Bremsung zu gewinnen.

### Definition der Getriebeübersetzung

Ist in einer Topologie ein Getriebe mit nur einer Gangstufe vorgesehen, stellt die Übersetzung immer einen Kompromiss zwischen optimaler Kraftübertragung, möglichst geringem Verbrauch und der Höchstgeschwindigkeit dar.

Zum einen definiert die Getriebeübersetzung, wie schnell der Motor im Verhältnis zu dem Rad dreht und wie

viel Motormoment für eine definierte Beschleunigung des Fahrzeugs notwendig ist. Da der Wirkungsgrad des Elektromotors vom abgegebenen Moment und von der Motordrehzahl abhängig ist, führt die gegebene Getriebeübersetzung in einem Fahrzyklus zu bestimmten Wirkungsgraden des Motors.

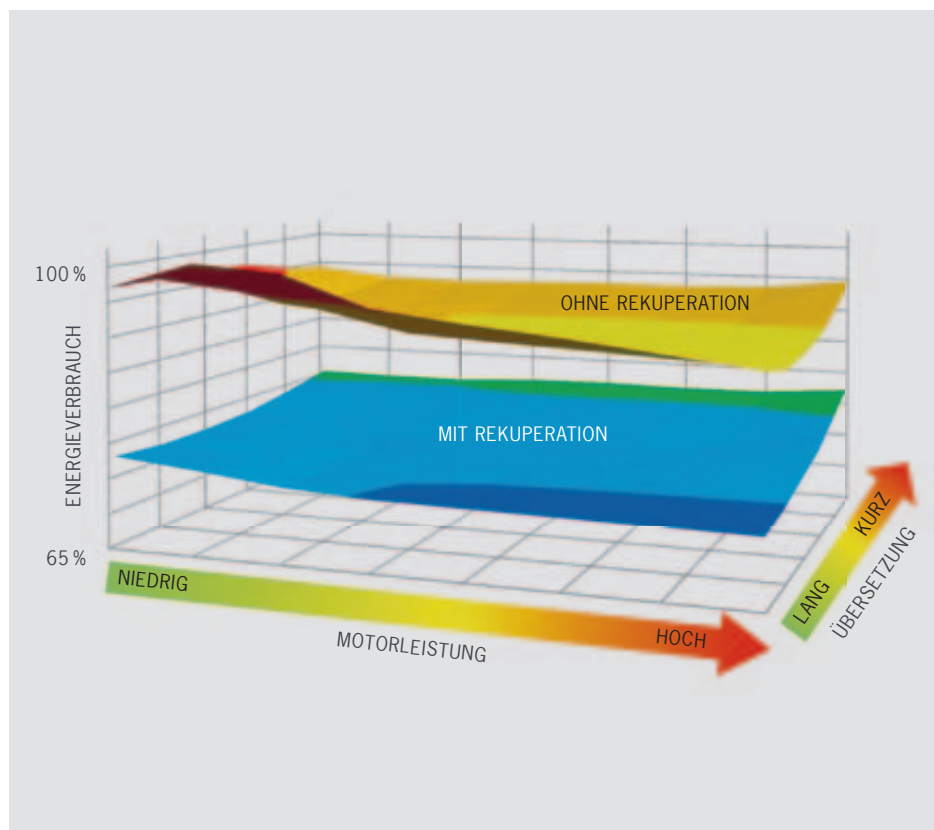
Zum anderen wird das Fahrzeug mit langer Übersetzung schlechtere Beschleunigungswerte erreichen, aber gleichzeitig – ausreichende Leistung vorausgesetzt – auch eine höhere Maximalgeschwindigkeit. Mit einer kurzen Übersetzung ist die Situation genau anders herum.

Da die drei Ziele (Beschleunigung, Verbrauch und Höchstgeschwindigkeit) möglicherweise jeweils unterschiedliche Übersetzungen benötigen, können Mehrganggetriebe eine Lösung sein. Diese ermöglichen es, die Fahrleistung und Arbeitspunktverteilung des Motors

weiter zu verbessern. Jedoch ist auch hier die Gesamtsystembetrachtung sehr wichtig, da die komplexeren Getriebe tendenziell schlechtere Wirkungsgrade haben und sich somit der Nutzen reduziert. Ob sich der Einsatz lohnt, muss im Einzelfall und mit Hinblick auf die Projektziele entschieden werden.

### Fazit

Die Herausforderungen im Rahmen der Elektrifizierung des Antriebs sind vielfältig. Neue Motor- und Batteriekonzepte werden kontinuierlich weiterentwickelt wie auch deren komplexe Steuerungssysteme und die Integration in die Fahrzeuge. Dies stellt stets neue Anforderungen an die Ingenieure, die flexibel und innovativ auf die veränderte Situation reagieren müssen. Porsche Engineering stellt sich seit Jahren in vielfältigen Projekten erfolgreich dieser Herausforderung. ■



Energieeinsparung im CAD durch Rekuperation