

Elektrische für alternative

Umweltbewusstsein und strikte Vorgaben an die Emissionswerte zwingen zur Entwicklung effizienterer Fahrzeuge mit geringerem Kraftstoffverbrauch, ohne dabei auf Fahrkomfort oder -spaß zu verzichten. Ein weiterer Beschleuniger dieses Prozesses ist die Aussicht auf eine Verknappung der fossilen Ressourcen und die zu erwartende Verteuerung der Treibstoffe.

In den Fokus ist hierbei, neben dem Hybridfahrzeug, auch das Elektrofahrzeug gerückt. Das Hybridfahrzeug verbindet die Antriebsleistung eines Verbrennungsmotors mit der einer oder mehrerer Elektromaschinen. Die hybride Energiespeicherung erfolgt durch einen herkömmlichen Treibstofftank und einen elektrischen Energiespeicher, beispielsweise eine Batterie. Das Elektrofahrzeug hingegen besitzt einen rein elektrischen Antriebsstrang, dessen Hauptkomponenten die elektrische Maschine, die zugehörige Leistungselektronik (Umrichter) und die Batterie sind.

Die Hybridisierung eines Fahrzeuges, also die teilweise Elektrifizierung des Antriebsstranges, kann in Leistungsabstufungen beschrieben werden. Die erste Stufe der Hybridisierung stellt dabei das Mikrohybrid-Fahrzeug dar. Bei diesem Fahrzeug sind der Startermotor und der Generator, die in jedem konventionellen Fahrzeug verbaut sind, in einer elektrischen Maschine dem so genannten Starter-Generator vereint. Durch die Verwendung einer Maschine 2,7-4 kW/t elektrische Leistung pro Fahrzeugmasse, die leistungsfähiger als ein herkömmlicher Startermotor ist, wird die „Start-Stopp-Automatik“ ermöglicht. Diese Funktionalität stoppt den Verbrennungsmotor beim Stillstand des Fahrzeuges und startet ihn wieder beim Anfahren, in dieser Betriebsart können fünf bis zehn Prozent des Treibstoffes eingespart werden.

Beim so genannten Mildhybrid werden Maschinen-Leistungen von 6-14 kW/t und direkt in den Antriebsstrang integriert. So ist es möglich, zusätzliche Antriebsleistung zur Verfügung zu stellen und regenerativ

zu Bremsen. Weiterhin kann der Verbrennungsmotor durch die so genannte Lastpunktanhebung in Betriebspunkten höherer Effizienz betrieben werden. Die dabei zusätzlich abgegebene Leistung wird von der elektrischen Maschine in elektrische Energie umgewandelt, die in der Batterie zwischengespeichert und bei der elektromotorischen Fahrt genutzt werden kann. Die erreichbaren Treibstoffeinsparungen beim Mildhybrid liegen bei zehn bis 20 Prozent.

Das Vollhybrid-Fahrzeug mit mehr als 20 kW/t bietet die Möglichkeit, bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit rein elektromotorisch und damit zeitweise und örtlich begrenzt vollkommen emissionsfrei zu fahren. Durch die hohe elektrische Leistung kann der Verbrennungsmotor kleiner ausgelegt werden, dies führt zu einer Reduzierung des Gewichtes und von Reibungsverlusten des Verbrennungsmotors. Bei Vollhybrid-

Fahrzeugen kann der Treibstoffverbrauch um 20 bis 30 Prozent gesenkt werden.

Wird ganz auf die konventionellen Antriebskomponenten wie Verbrennungsmotor, Getriebe und Treibstofftank verzichtet und der Antriebsstrang rein elektrisch aufgebaut, spricht man von einem Elektrofahrzeug.

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten spielt mehr denn je eine enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Themenbereichen eine wichtige Rolle. Ein Beispiel hierfür stellt das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderte Vorhaben „Europa Hybrid – Innovativer PKW-Hybridantrieb für Europa“ dar, siehe Bild 2a. Bei diesem wird unter der Leitung der FEV Motorentechnik im Verbund von Industrie und der RWTH Aachen ein paralleles Vollhybridfahrzeug aufgebaut. Seitens der RWTH

Aachen sind das Institut für elektrische Maschinen (IEM), das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), das Institut für Regelungstechnik (IRT) und der Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) beteiligt.

Die Anforderungen an die elektrischen Maschinen, die sich aus den einzelnen Fahrzeugkonzepten und Funktionalitäten ergeben, sind sehr umfangreich. Die Hauptanforderungen entsprechen den allgemeinen Anforderungen einer elektrischen Maschine: Ein geringes Gewicht des Fahrzeuges reduziert den Verbrauch. Bei Hybridfahrzeugen und der Integration in den Motorraum sind ein kleines Bauvolumen und damit eine hohe Leistungsdichte von entscheidender Bedeutung. Die Zuverlässigkeit wird im Hinblick auf den Wartungsaufwand des Gesamtfahrzeuges ebenfalls als hoch vorausgesetzt. Eine hohe Überlastfähigkeit bietet kurz-

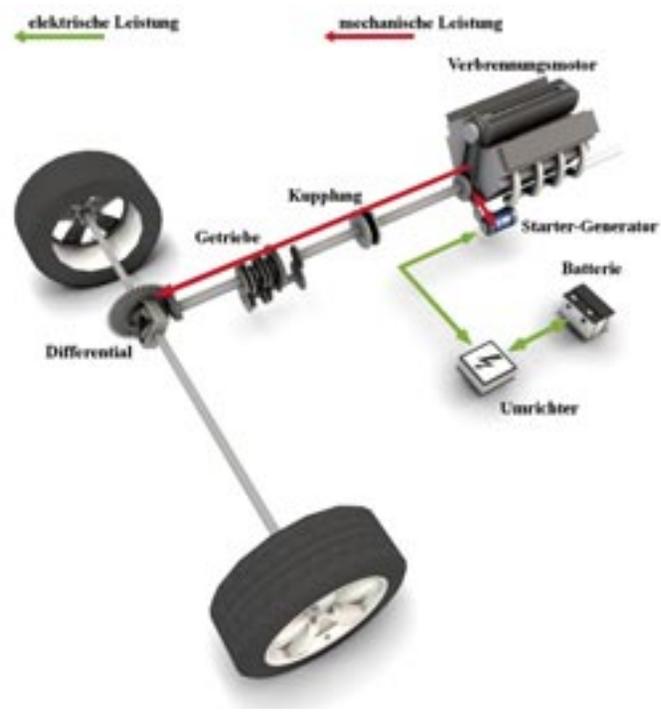


Bild 1: Unterschiedliche Fahrzeugkonzepte
Bild a: Mikrohybrid

Maschinen Antriebskonzepte

Anforderungen und Auslegungskriterien

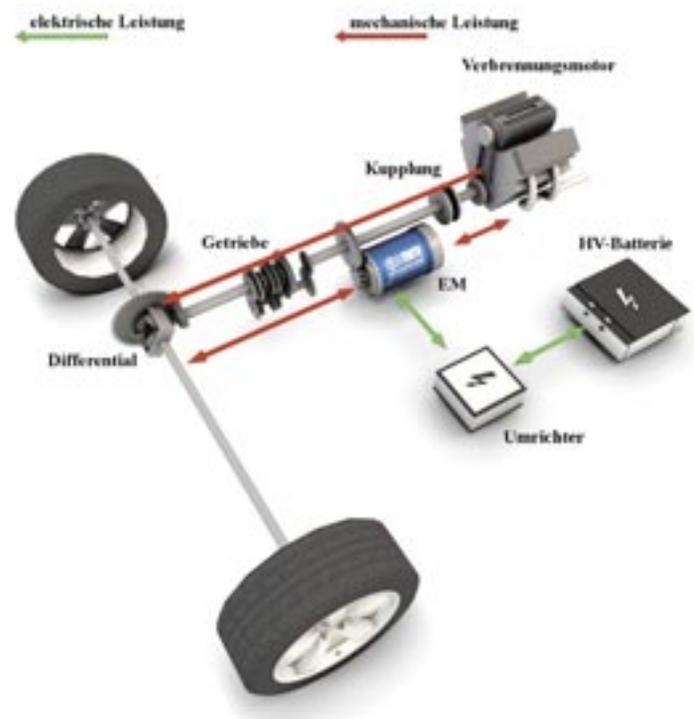
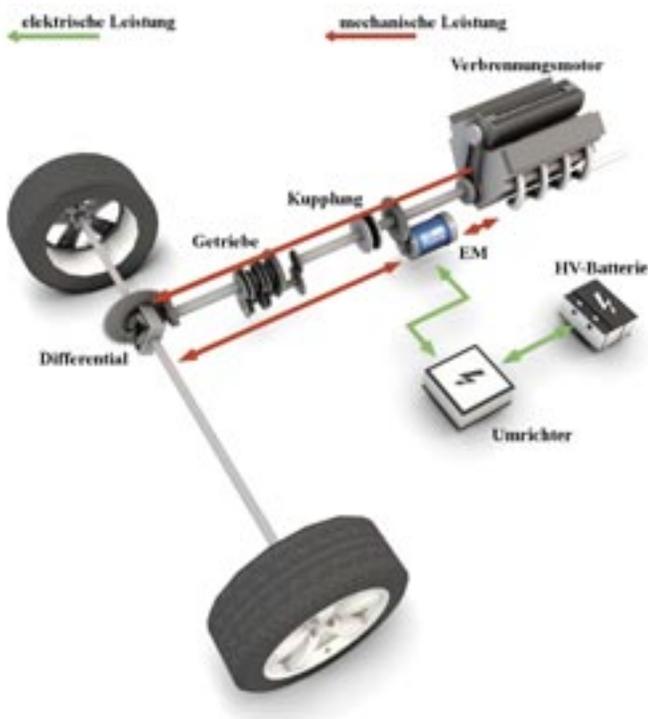


Bild (b) Mildhybrid

Bild (c) Vollhybrid (parallel)

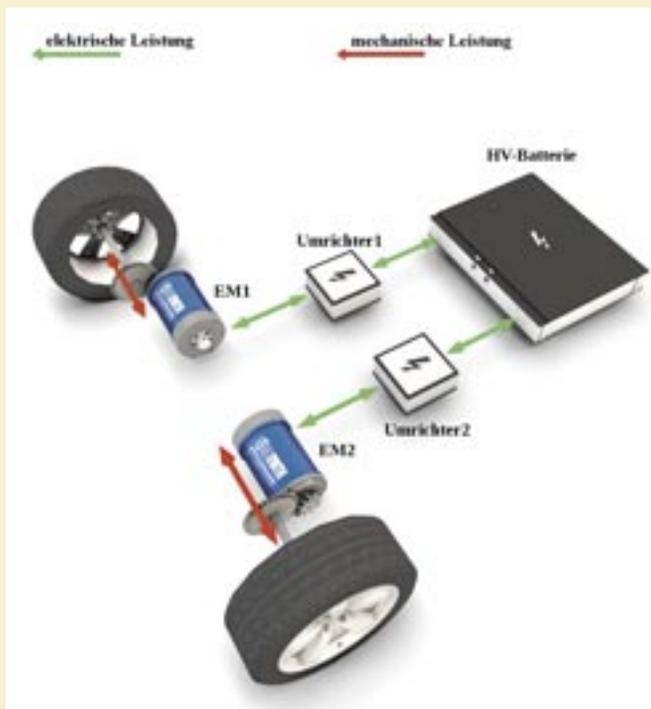
fristig eine möglichst große Maximalleistung, zum Beispiel für Beschleunigungs- oder Überholvorgänge.

Die wichtigste Anforderung ist jedoch ein guter Wirkungsgrad der elektrischen Maschine. Anders als industriell verwendete Maschinen, wie bei Pumpen oder sonstigen Antrieben, die oft nur bei einer bestimmten Drehzahl und Last betrieben werden, können bei einem elektrischen Fahrzeugantrieb je nach Geschwindigkeit, Brems- oder Beschleunigungsvorgang alle möglichen Drehzahlen und Lasten (Drehmomente) auftreten. Deswegen muss auch der Wirkungsgrad der Maschine über einen möglichst großen Drehmoment- und Drehzahlbereich hoch sein. Es spielt also nicht in erster Linie der maximale Wirkungsgrad der Maschine eine Rolle, sondern der gemittelte Gesamt-Systemwirkungsgrad während einer Fahrt. Dies bedeutet, dass die

Betriebspunkte, die während einer Fahrt auftreten, möglichst in dem Drehmoment- und Drehzahlbereich liegen, in denen die Maschine ihren besten Wirkungsgrad besitzt. Dies jedoch führt zu der Frage: Was sind die typischen Betriebspunkte der elektrischen Maschine?

Aus diesem Grund werden Fahrzeugsimulationen durchgeführt. Die verwendeten Simulationsmodelle, siehe Bild 2b, enthalten dabei die einzelnen Komponenten und ihre Eigenschaften: wie beispielsweise der Verbrennungsmotor, das Getriebe, die elektrische(n) Maschine(n), die Batterie und die zentrale Fahrzeugregelung. Als Eingangsgröße dienen hierbei Fahrprofile; Fahrzyklen, die zeitabhängige Geschwindigkeitswerte enthalten. Das für die Auslegung der elektrischen Maschine entscheidende Ergebnis ist die Häufigkeitsverteilung der geforderten Betriebspunkte,

Bild (d) Elektrofahrzeug



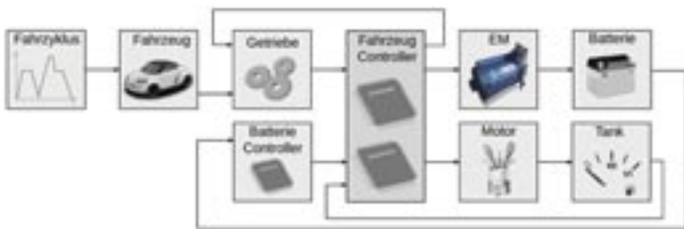
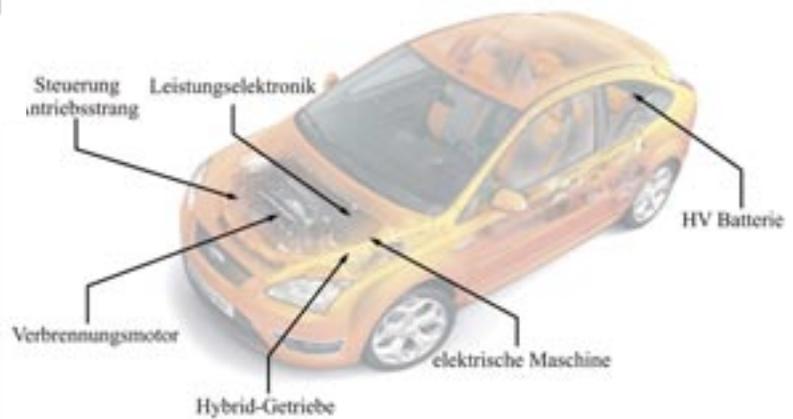


Bild 2: Beispiel eines parallelen Vollhybridfahrzeuges.
(a) Hauptkomponenten des Europa Hybrid.

(b) Simulationsmodell eines parallelen Hybridfahrzeuges.



siehe Bild 3. Diese unterscheidet sich erheblich für verschiedene Fahrzeuge, Fahrzeugkonzepte und verwendete Fahrzyklen. Somit ist es wichtig, dass realitätsnahe Fahrzyklen verwendet werden: es sollten verschiedene Fahrzyklen wie Stadt-, Überland-, Autobahn- oder spezialisierte Fahrten betrachtet und das Ergebnis entsprechend dem späteren Verwendungszweck gewichtet werden.

Nach der Ermittlung der Häufigkeitsverteilung muss zunächst der passende Maschinentyp gewählt werden. Die zurzeit hauptsächlich verwendeten Maschinentypen sind die Asynchronmaschine, kurz ASM, und die Permanentmagneterregte Synchronmaschine, kurz PMSM.

Neben diesen beiden können auch Alternativen wie die Transversalfeldmaschine oder die geschaltete Reluktanzmaschine (siehe Artikel Seite 50) betrachtet werden.

PMSM und ASM haben Vor- und Nachteile: So ist die ASM eine kostengünstige, ro-

buste und zuverlässige Maschine, die gerade bei hohen Drehzahlen einen guten Wirkungsgrad besitzt. Die PMSM hingegen hat durch die Verwendung von Selten-Erd-Magnete eine hohe Leistungsdichte und kann sehr kompakt und mit geringerem Gewicht gebaut werden. Der beste Wirkungsgrad liegt bei dieser Maschine bei niedrigen Drehzahlen. Die PMSM ist teurer, allerdings kann bei einem höheren Gesamtwirkungsgrad auch die Batterie und damit der größte Kostenfaktor gesenkt werden. Wenn beispielsweise bei einem für den Stadtverkehr vorgesehenem Fahrzeug der Gesamtwirkungsgrad durch die Verwendung einer PMSM um zehn Prozent gesteigert wird, kann die Kapazität der Batterie bei gleichbleibender Reichweite um den gleichen Faktor verringert werden. Die Verbrauchseinsparung durch das geringere Gewicht der Batterie ist hierbei noch nicht berücksichtigt. Bei den aktuellen Maschinen- und Batteriekosten, würden die Gesamtkosten trotz der Verwen-

dung einer teureren Maschine gesenkt werden, fallen die Batteriekosten durch gesteigerte Produktionszahlen, wie für die nächsten Jahre angenommen wird, kann diese Bewertung anders ausfallen.

Nach der Auswahl der Maschinentyps muss die fahrzyklusgerechte Auslegung der elektrischen Maschine durchgeführt werden. Dabei muss der optimale Wirkungsgradbereich später den Bereich abdecken, in dem die häufigsten Betriebspunkte der elektrischen Maschine während einer Fahrt zu finden sind. So kann über geometrische Variationen die Bereiche des besten Wirkungsgrades in Richtung der Drehmoment-Achse oder der Drehzahl-Achse verschoben werden. Ziel ist es, den Gesamtwirkungsgrad über einen typischen Fahrzyklus zu optimieren und den Energie- oder Treibstoff-Verbrauch zu minimieren. In Bild 4 ist dargestellt, wie verschiedene Maschinenauslegungen den Gesamtwirkungsgrad beeinflussen können. Als Randbedingung ist eine gleichbleibende äußere Abmessung ange-

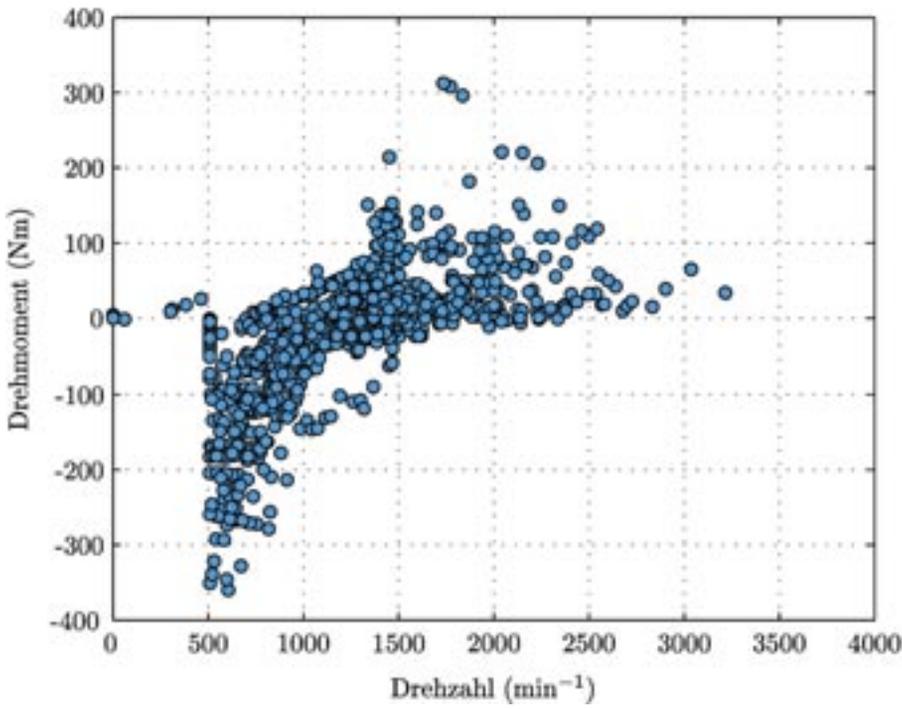
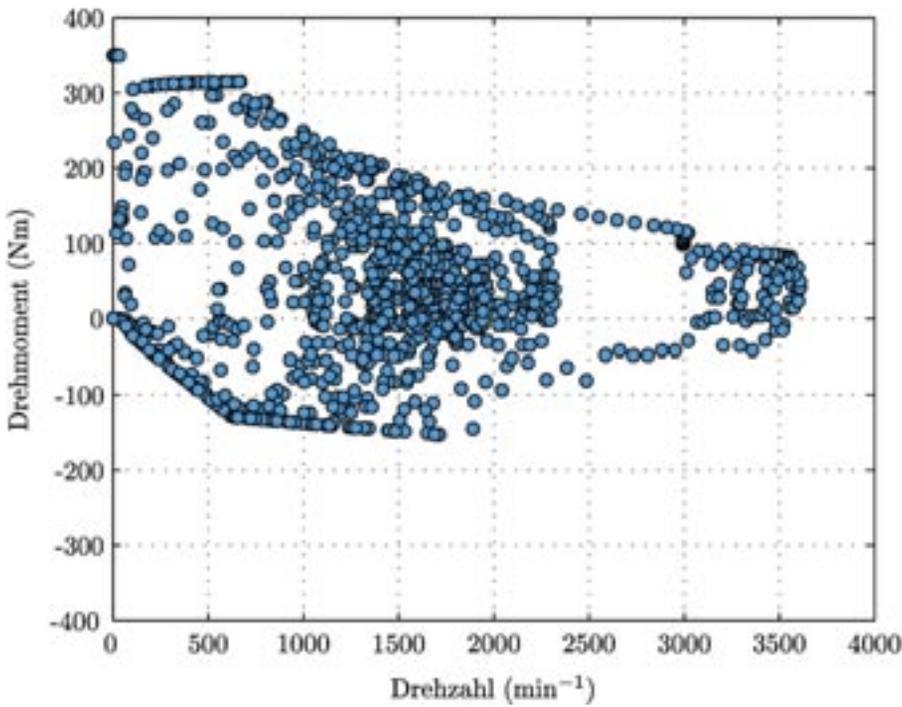
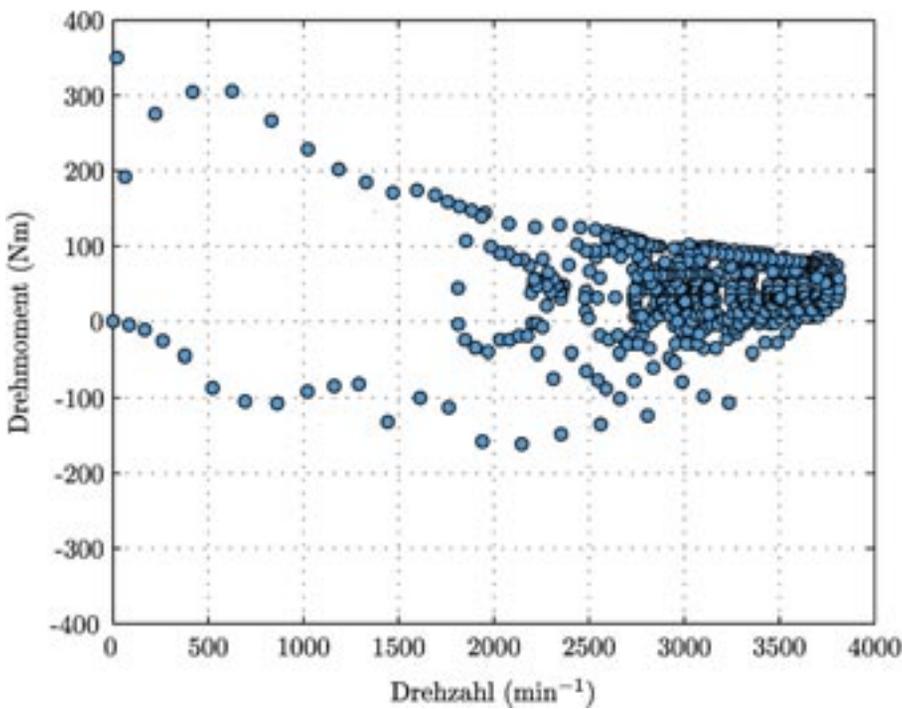


Bild 3: Unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen für verschiedene Fahrzeuge und Fahrzyklen.

(a) Stadtfahrt, paralleler Vollhybrid



(b) Stadtfahrt, Elektrofahrzeug



(c) Überlandfahrt, Elektrofahrzeug

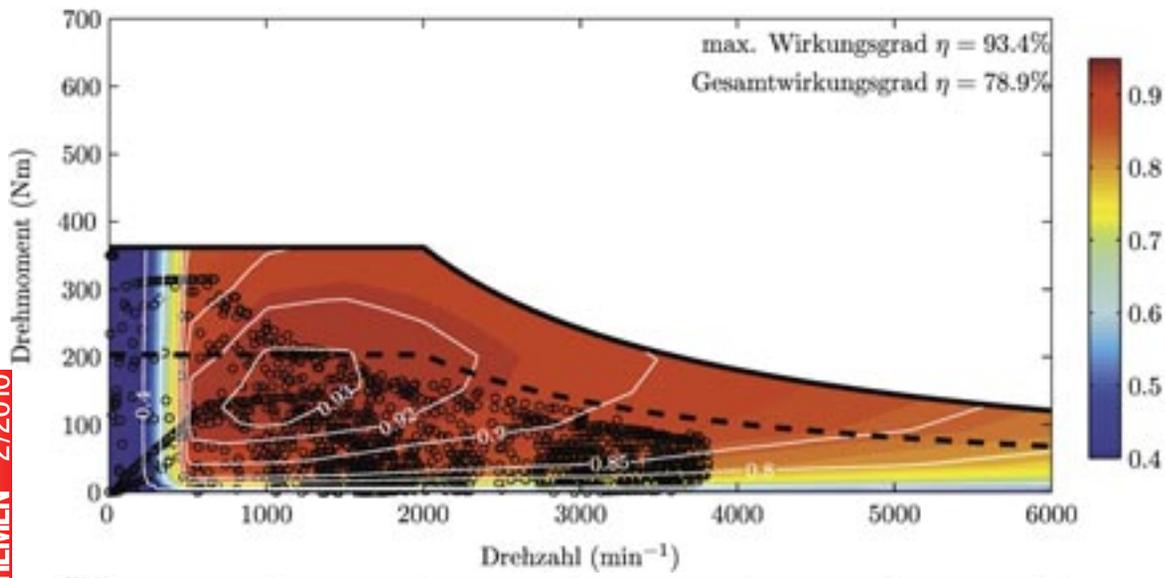
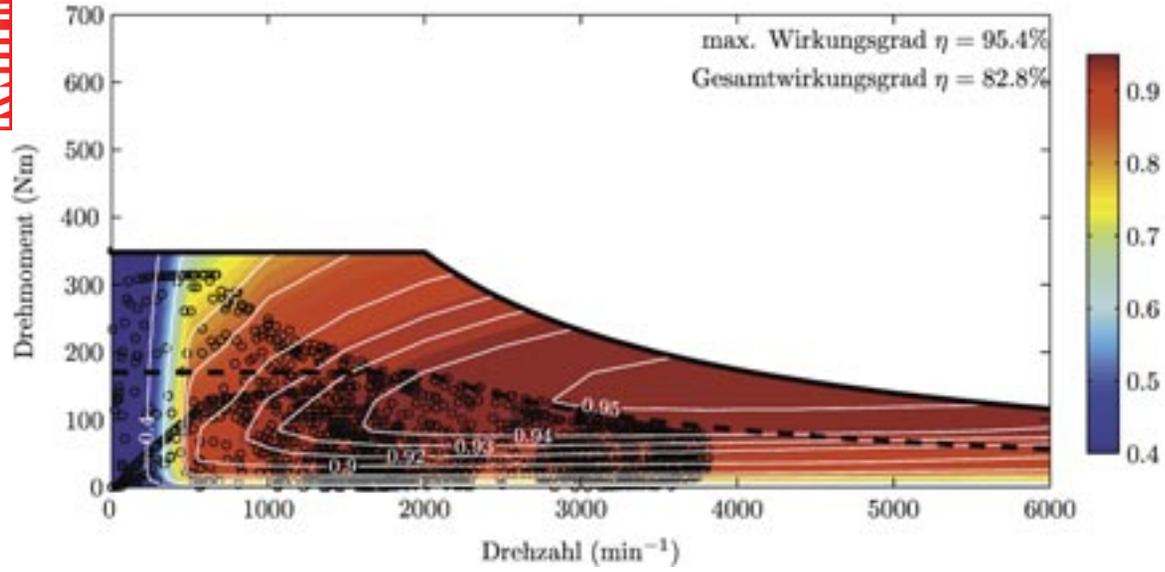
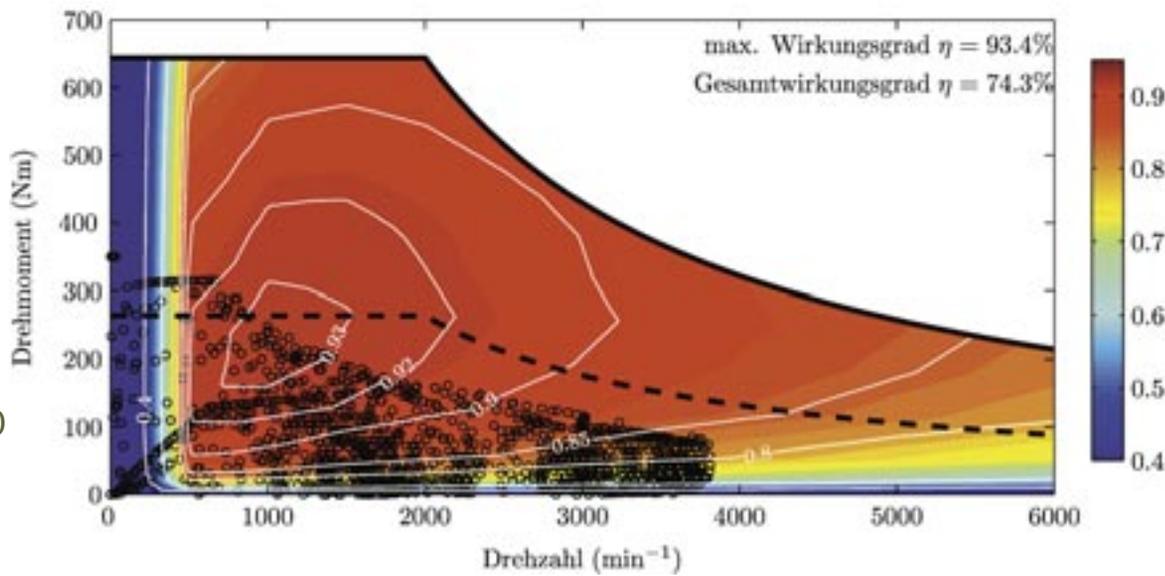


Bild 4: Unterschiedliche Maschinenauslegungen, ihre Wirkungsgradkennfelder und Gesamtwirkungsgrade.

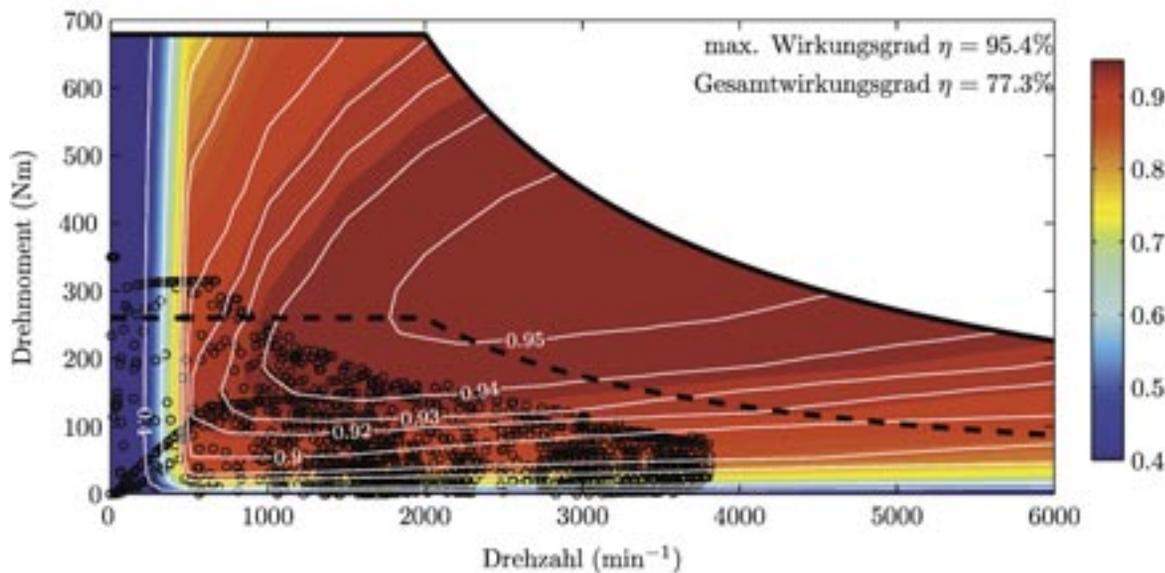
(a) Wirkungsgrade, Geometrie1



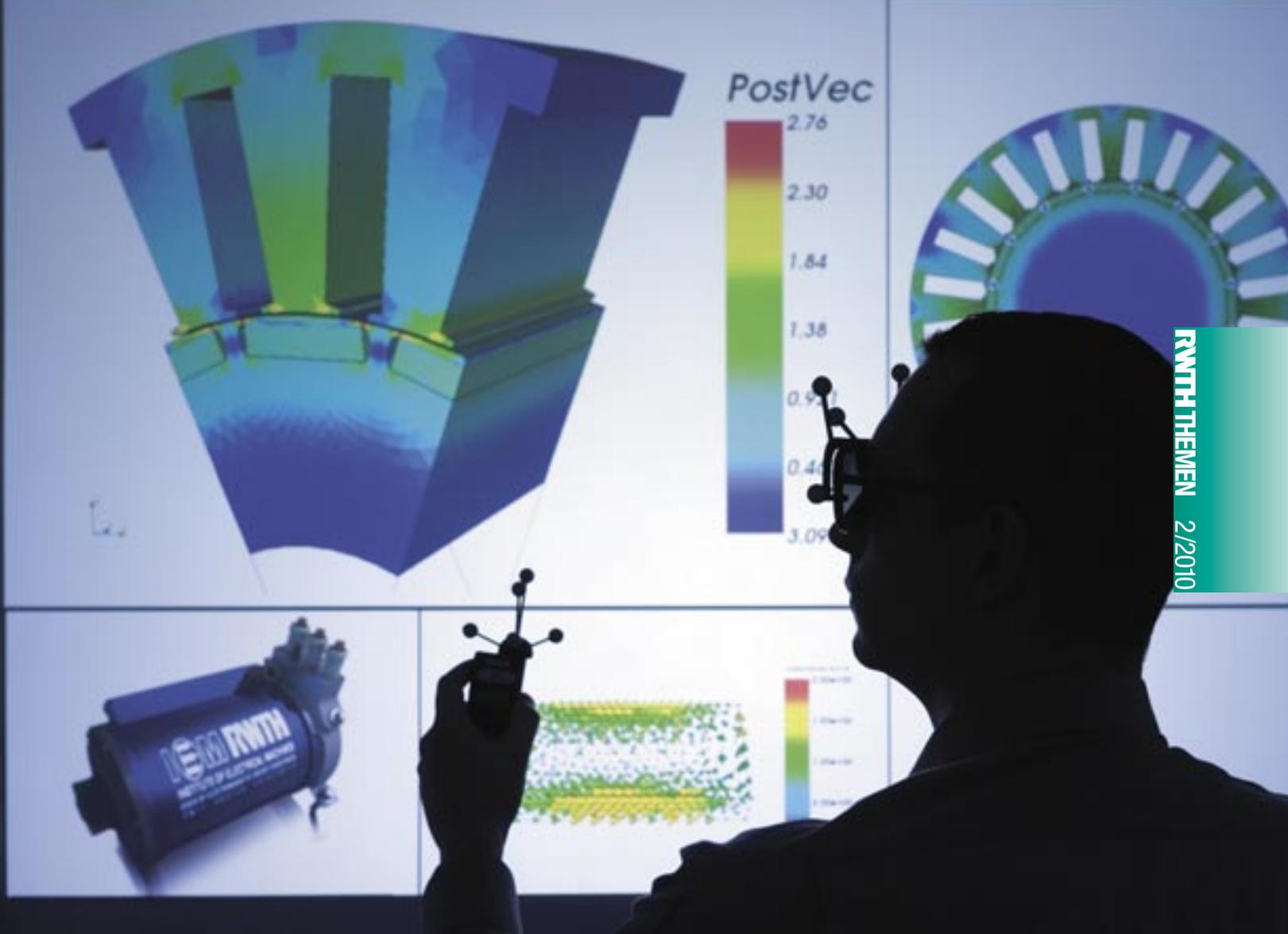
(b) Wirkungsgrade, Geometrie2



(c) Wirkungsgrade, Geometrie3



(d) Wirkungsgrade, Geometrie4



nommen. Auch wenn der maximale Wirkungsgrad nahezu identisch ist, kommt es doch zu starken Abweichungen beim gemittelten Wirkungsgrad.

Für die Auslegung und Optimierung der elektrischen Maschinen wird am Institut für Elektrische Maschinen eigene Software eingesetzt, die ständig weiter entwickelt wird. Daraus ergibt sich der Vorteil der vollkommenen Transparenz und der Möglichkeit, diese den Bedürfnissen anzupassen und eine hohe Automatisierung zu erreichen. Die erste Grobauslegung der elektrischen Maschine erfolgt dabei durch schnelle analytische Berechnungsmethoden. Die Feinauslegung und Optimierung wird mit der numerischen Finite-Elemente-Methode durchgeführt, die es ermöglicht neben den elektrischen Leistungsdaten auch sämtliche auftretende Verluste zu berechnen und die erforderlichen Wirkungsgradkennfelder zu bestimmen. Zudem besteht die Möglichkeit, akustische Problemstellungen mit Hilfe von strukturdynamischen Simulationsmodellen zu lösen.

Autoren:
Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Dr. h.c. Kay Hameyer ist Leiter des Instituts für elektrische Maschinen, kurz IEM.
Dipl.-Ing. Thomas Finken ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter Automotive am Institut für elektrische Maschinen (IEM) sowie Referent für Elektrotechnik in der Geschäftsstelle Elektromobilität.

*Bild 5: Das Institut für Elektrische Maschinen nutzt die Holobench mit Tracking-system unter anderem zur 3D-Visualisierung von magnetischen Feldverteilungen in Motoren für Elektrofahrzeuge. Für die Optimierung der elektrischen Maschine identifiziert Dipl.-Ing. Thomas Finken Gebiete hoher Verluste oder auftretende magnetische Sättigungen.
Foto: Peter Winandy*