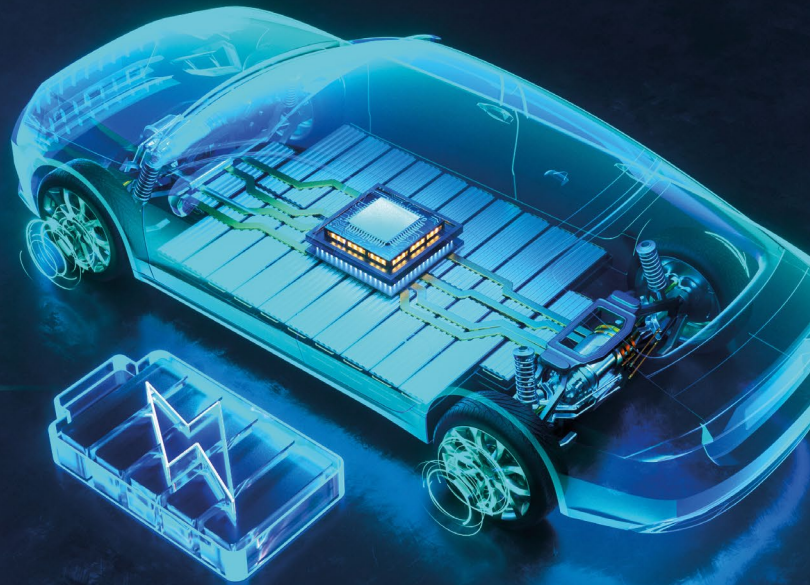


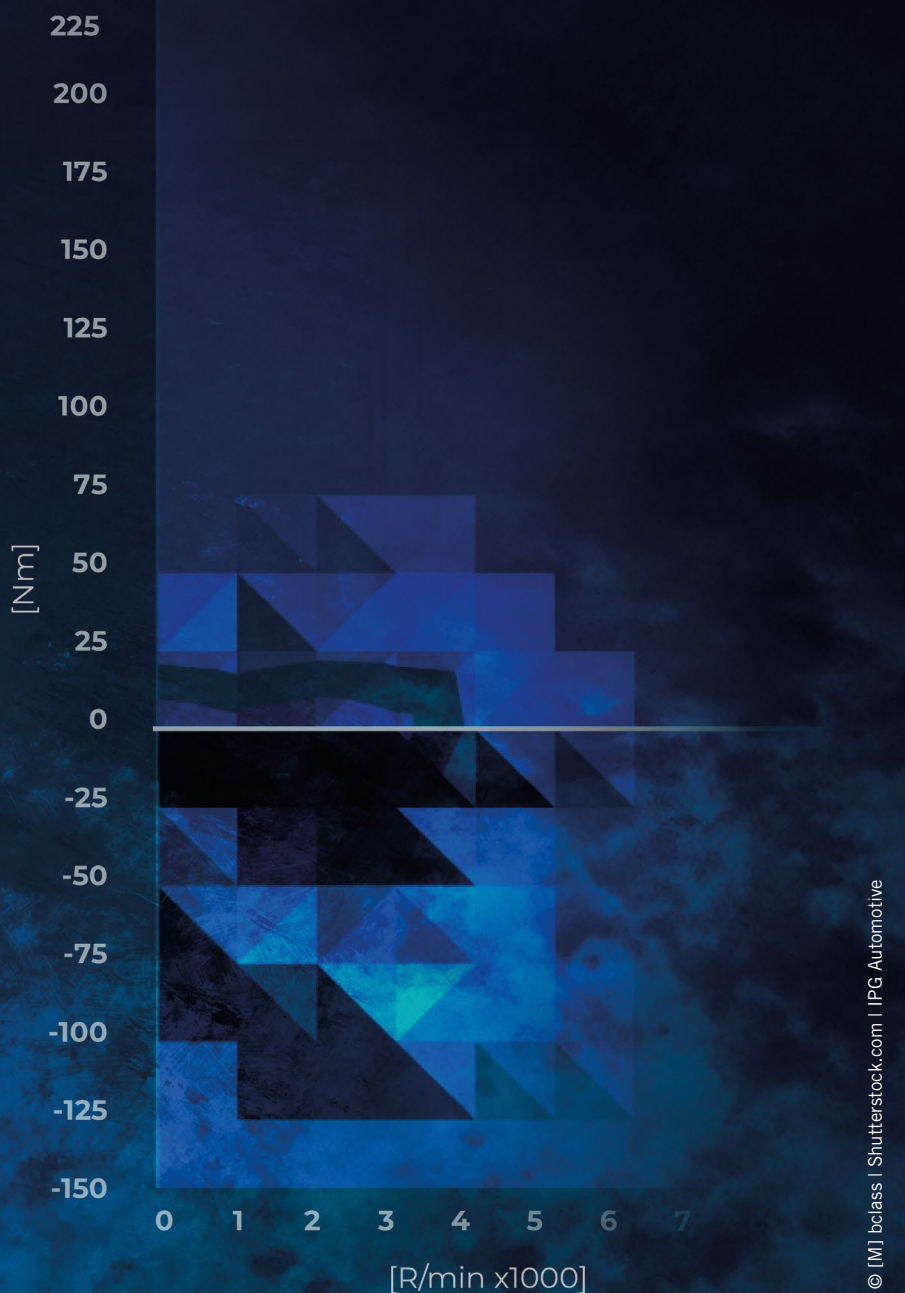
[Nm]

200
175
150
125
100
75
50
25
0
-25
-50
-75
-100
-125



Betriebsfeste Auslegung von Elektrofahrzeugen auf Basis virtueller Lastdaten

Die steigende Nachfrage nach Elektro-Pkw verändert die Entwicklung von Traktionsantrieben. IPG Automotive erläutert den Einfluss von Software sowie Fahrer auf die Lastprofile und stellt eine darauf abgestimmte Kalibrierungsmethode vor. Mit dem beschriebenen modellbasierten Simulationsansatz können Lastdaten auf Gesamtsystemebene generiert werden, ohne auf physische Fahrzeugprototypen angewiesen zu sein.



© [M] belass | Shutterstock.com | IPG Automotive

VERFASST VON



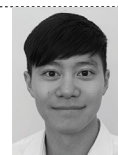
Dr. Felix Pfister

ist Business Development Manager
Powertrain bei der IPG Automotive
GmbH in Karlsruhe.



Dr. Pascal Piecha

ist Business Development Manager
Powertrain bei der IPG Automotive
GmbH in Karlsruhe.



Dr. Steven Yan

ist Business Development Manager
Powertrain bei der IPG Automotive
GmbH in Karlsruhe.



Henning Kemper

ist Specialist Editor bei
der IPG Automotive GmbH
in Karlsruhe.

Die Zuverlässigkeit ist eine der wichtigsten Produkteigenschaften und integraler Bestandteil der Qualität von Kraftfahrzeugen [1]. Der Elektroantriebsstrang erfordert hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit optimal aufeinander abgestimmte Komponenten. Dabei sind verschiedene Herausforderungen zu bewältigen, die ein kritisches Hinterfragen bestehender Prozesse und, darauf aufbauend, neue Lösungsansätze erfordern.

So liegen deutlich weniger oder gar keine realen Felddaten aus früheren Entwicklungen oder der Garantiedatenauswertung vor. Die in den Testfahrten tatsächlich wirkenden Kräfte und Momente (sogenannte Last-Zeit-Reihen) sind daher häufig noch unbekannt.

Der traditionell wichtige experimentelle Zuverlässigkeitsnachweis – die erfahrungsbasierte Auslegung – kann nicht erbracht werden.

Aus dem Bereich der Verbrennungsmotoren gut bekannte Phänomene wie Ruckeln oder Klackern sowie die daraus resultierenden Versagensphänomene entfallen ebenso wie durch Schalt- oder Lastwechselereignisse erzeugte Effekte. Gleichzeitig können auch bei Elektromotoren Antriebsdrehmomentwelligkeiten oder Rastmomente (Drive Torque Ripples oder Cogging Torques) auftreten, die sich negativ auf die Dauerhaltbarkeit auswirken können. Diese Phänomene werden auch unter dem Begriff „Toxic Torque“ zusammengefasst und bezeichnen alle

Frequenzanteile, die nicht dem Vortrieb dienen [2].

Ein Schwerpunkt dieses Artikels liegt auf der Darstellung einer Methode, die von den Autoren als Smart Durability (intelligente Dauerhaltbarkeit) bezeichnet wird. Dabei werden schadigungsrelevante Lasten durch Software und Betriebsstrategie optimal zwischen Front- und Heckmotor sowie zwischen regenerativem und dissipativem Bremsen verschoben. Es ist ein multikriterielles Optimierungsproblem, die Softwarefunktionen für die Aktorik so zu kalibrieren, dass ein Optimum aus Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Energiebedarf, Fahrbarkeit und Kosten erreicht wird. Die in der Elektromobilität zunehmenden Trends in

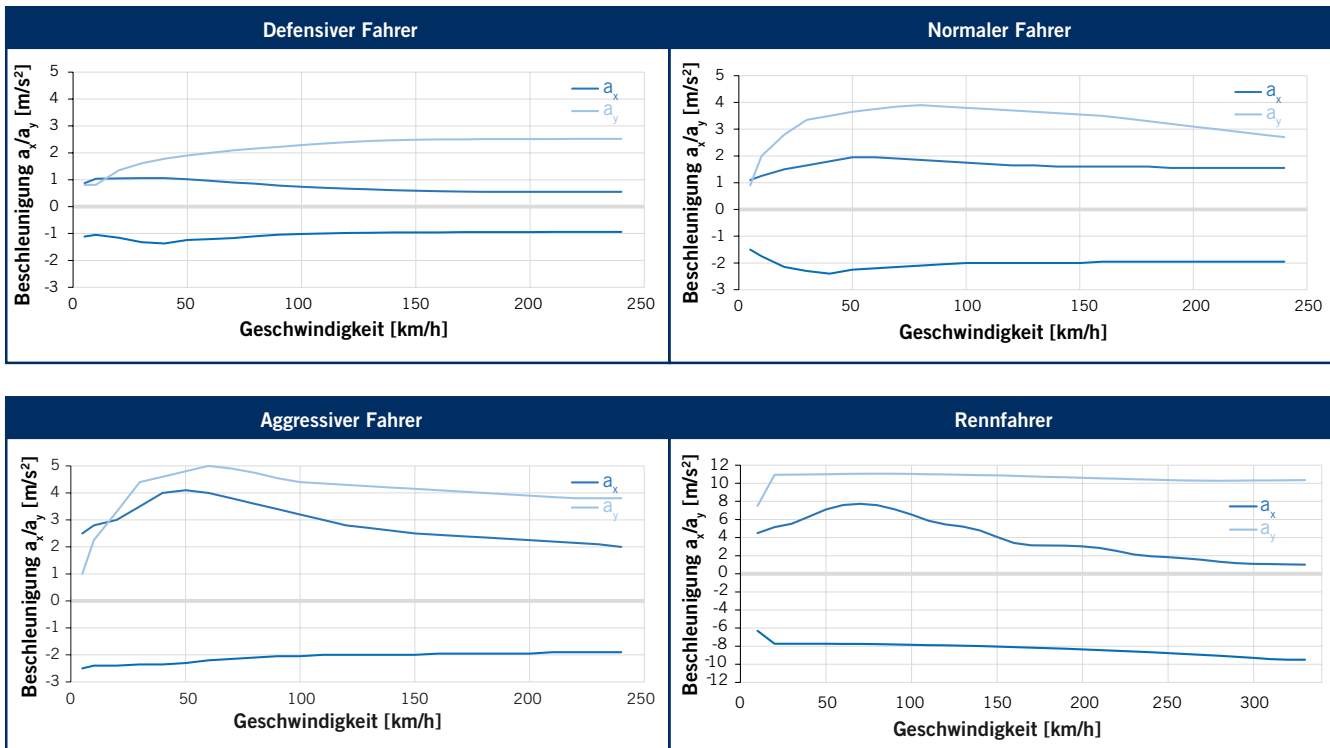


BILD 1 Geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungsgrenzen für die vier Fahrermodelle (a_x und a_y : Längs- und Querbeschleunigung)
(© IPG Automotive)

Richtung Allradantrieb und regeneratives Bremsen eröffnen hier neue Felder.

Auch kann das im Vergleich zu Verbrennungsmotoren um den Faktor 10 bis 100 schnellere Regel- und Ansprechverhalten von Elektromotoren dazu genutzt werden, schädigungsrelevante Lastspitzen durch eine intelligente Regelung aktiv zu dämpfen. Schäden können etwa beim Überfahren eines Bordsteins über den Reifen-Fahrbahn-Kontakt in den Antriebsstrang eingeleitet werden. Umgekehrt können aggressive Stellgeschwindigkeiten bei unsachgemäßer Kalibrierung zu schädigungsrelevanten Drehmomentsprüngen oder Lastspitzen führen.

Diese speziellen Herausforderungen der Elektromobilität überlagern sich mit globalen Trends. Dazu gehören gestiegene Kundenerwartungen an Gewichtsreduktion und Energieeffizienz, die zu höheren Leistungsdichten und damit zu geringerer Zuverlässigkeit führen. Dieser Problematik kann nur durch eine höhere Genauigkeit der eingesetzten Methoden entgegen gewirkt werden. Dies hat zur Folge, dass die Zuverlässigkeitsvorhersage und -optimierung, wie sie durch Testkampagnen auf Basis virtuell erzeugter Referenzlasten möglich sind, in der Simulation

immer mehr in den Fokus der Entwicklungsaktivitäten rücken.

VORGEHENSWEISE

Die Ableitung entsprechender Lastprofile beginnt mit der Planung einer virtuellen Messkampagne, bei der die im späteren Realbetrieb auftretenden Referenzlasten und Betriebszustände an einem virtuellen Fahrzeugprototyp über virtuelle Messkanäle erfasst werden. Dazu wird das virtuelle (softwaredefinierte) Fahrzeug in eine virtuelle Umgebung eingebettet, die aus Fahrer, Fahrbahn und Verkehr besteht [3].

Dieser ganzheitliche, modellbasierte Ansatz ermöglicht die Generierung aussagekräftiger, nutzungsorientierter Lastverteilungen für globale Märkte. Er umfasst Modelle für verschiedene Arten von Fahrern, Fahrzeugen, Topografien, gesetzlichen Einschränkungen sowie klimatischen Bedingungen und bietet ein hohes Maß an Flexibilität und Kontrolle über die Nutzungsvervielfältigung. Lastdaten und -verteilungen sowie die zugehörigen Sensitivitäten können durch die Variation der Randbedingungen und verschiedener Nutzungsprofile virtuell bestimmt werden [4].

FAHRZEUGMODELL

Der vorgestellte Simulationsansatz enthält als zentrales Element ein realistisches, modulares, mechatronisches Fahrzeugmodell. Dieses bildet die relevante Mehrkörperdynamik und Smart-Durability-Regelungstechnik über virtuelle Steuergeräte (Virtual Control Units, VCUs) für die Aktoren (für Antriebe und Bremsen) ab. Das Modell wird konsistent zum realen Fahrzeug für die Planung der Lebensdauerversuche parametrisiert [5].

Im hier behandelten Beispiel mit Fokus auf die Testmethodik kommt ein Elektrofahrzeug mit Allradantrieb und einem Motor pro Achse zum Einsatz. Es verfügt über eine Gewichtsverteilung von 50:50 und eine Bremskraftverteilung von 2:1 (vorn/hinten). Zur Verteilung des erforderlichen Gesamtdrehmoments zwischen Vorder- und Hinterachse wurden verschiedene Motortypen und Torque-Vectoring-Strategien (TVS) eingesetzt. Dies ermöglicht eine hardware- und softwareseitige Kalibrierung des Fahrzeugs sowie eine präzise Abbildung der Betriebszustände und Lastverteilungen im virtuellen Fahrbetrieb.

Beispielhaft kommen verschiedene Rekuperationsstrategien zum Einsatz. Die Reibungsbremsen beider Achsen werden nur dann eingesetzt, wenn das erforderliche Bremsmoment das maximale Rekuperationsmoment des Elektromotors an der entsprechenden Achse übersteigt. Unterhalb von 12,5 km/h ist keine Rekuperation vorgesehen. Der Antriebsstrang ermöglicht eine elektrothermische oder elektrochemische Rekuperation sowie einen Mischbetrieb. Im Rahmen der Fahrversuche wurden nicht nur die TVS, sondern auch das Fahrverhalten und das Umgebungsmodell variiert.

FAHRERMODELL

Die CarMaker-Simulationsumgebung von IPG Automotive bietet ein Fahrermodell, das in der Lage ist, das virtuelle Fahrzeug unter Berücksichtigung des Streckenverlaufs, des Verkehrsaufkommens und eines repräsentativen Fahrverhaltens zu bewegen. Eine zentrale Eigenschaft des Fahrermodells ist die geschwindigkeitsabhängige und nichtlinear gekoppelte Parametrierung der Längs- und Querschleunigungsgrenzen, um die Parametrierung an verschiedene Zielgruppen und Referenzpopulationen anpassen zu können.

Für die folgenden Untersuchungen wurden ein defensiver, ein normaler sowie ein aggressiver Fahrer parametrisiert und zusätzlich ein Rennfahrer, der höhere Längsbeschleunigungen und -verzögerungen sowie Querschleunigungen repräsentiert, **BILD 1**. In Längsrichtung ist die Parametrierung in Beschleunigung und Verzögerung unterteilt.

VERKEHRSMODELL

Auch für die Verkehrsmodellierung bietet die Simulationsumgebung CarMaker verschiedene Ansätze. Für einfache und klar definierte Verkehrssituationen bietet es sich an, Verkehrsobjekte mit eigener Trajektorie in das Testszenario zu integrieren. Alternativ bewegen sie sich autonom auf der Straße.

Neben der aktiven Berechnung von Verkehrsobjekten kann auch nur deren Einfluss auf das Egofahrzeug modelliert werden, um die erreichbare Geschwindigkeit zu begrenzen. Bei diesem phänomenologischen Ansatz werden sogenannte Zielgeschwindigkeitsmarker auf der Fahrbahn platziert. Innerhalb dieser Randbedingungen und Vorgaben entscheidet das Fahrermodell selbstständig über die Fahrdynamik. Im nachfolgend beschriebenen Beispiel wurden die modellierten Verkehrssituationen durch Geschwindigkeitsmarker aus einer realen Fahrdatenbank generiert. Diese wurden nach Verkehrsdichte und Streckenart klassifiziert und entlang der digitalisierten Strecke verteilt.

ANWENDUNGSFÄLLE

Um die Nutzungsvariabilität der im späteren Realbetrieb auftretenden Betriebszustände exemplarisch abzubilden, wurde das virtuelle Fahrzeug auf fünf nachfolgend beschriebenen virtuellen Referenzstrecken bewegt. Dazu zählen gerade Strecke, Rennstrecke, Bergpassstraße, RDE-Szenario und Stadtszenario.



AUTOMOTIVE

Steckverbinder

Rosenberger steht für innovative Steckverbinder-Systeme, die in modernen Fahrzeugen unverzichtbar sind – heute und in Zukunft.

Ob FAKRA- oder High-Speed-FAKRA-Mini-Steckverbinder, High-Power- oder High-Speed-Daten-Steckverbinder, Hochvolt- oder Power-Data-Magnetsteckverbinder – unsere Automotive-Systeme von heute sind entwickelt für die Mobilität von morgen:

- Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)
- Autonomes Fahren
- Navigation und Telematik
- Infotainment- und Fond-Entertainment-Systeme
- Internet und Mobilkommunikation
- Batterielade-Applikationen und Stromversorgung in Elektro- und Hybridfahrzeugen.



www.rosenberger.com

Rosenberger

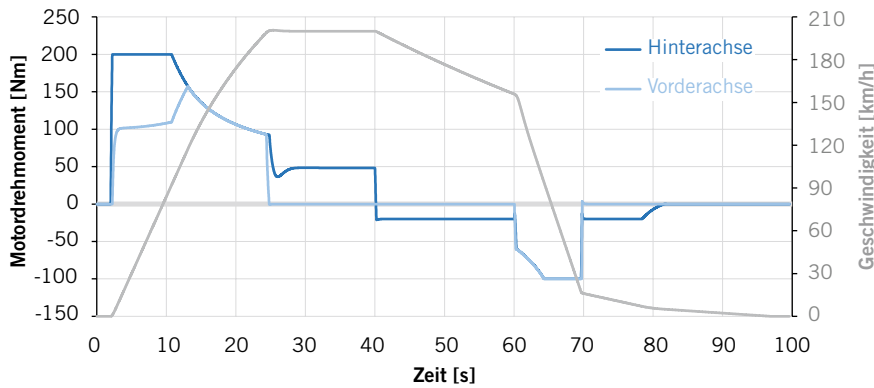


BILD 2 Motordrehmoment (Blautöne) und Geschwindigkeit (grau) für variable Torque-Vectoring-Strategien beim Beschleunigen (3 m/s^2), Ausrollen und Bremsen (© IPG Automotive)

GERADE STRECKE

Um Erkenntnisse über die Implementierung der TVS zu gewinnen, wurde ein Test auf gerader Strecke durchgeführt. **BILD 2** zeigt den signifikanten Einfluss der Betriebsstrategie auf die lebensdauerrelevanten Belastungen.

Es waren beide Motoren an der Vorder- und Hinterachse mit wechselnder Lastverteilung erforderlich, um das ge-

wünschte Gesamtdrehmoment während der Beschleunigung zu erreichen. Um die Geschwindigkeit konstant zu halten (Zeitpunkt 25 bis 40 s), wurde nur der Heckmotor benötigt. Beim anschließenden Ausrollen reperierte nur der Heckmotor mit einem sehr geringen Drehmoment. Während der Verzögerungsphase (ab Zeitpunkt 60 s) wurde das Bremspedal betätigt, sodass beide Motoren für eine starke Energierekupe-

ration zum Einsatz kamen. Das Fahrzeug rollte schließlich bis zum Stillstand aus.

RENNSTRECKE

Neuentwickelte Fahrzeuge werden vor einer Markteinführung unter härtesten Bedingungen auf Marterstrecken getestet. Um dies abzubilden, wurde eine Messkampagne auf der Rennstrecke Nürburgring Nordschleife durchgeführt. Hier zeigte sich aufgrund des anspruchsvollen Lastprofils ein geringer Einfluss der intelligenten Betriebsstrategie zur Adaptierung der Momentenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse auf die Häufigkeiten der Antriebsstranglasten und Lastverteilungen, **BILD 3**.

BERGPASSSTRASSE

Auf einer Gesamtlänge von etwa 44 km beträgt der Höhenunterschied der Passstraße Stilfser Joch vom Start im Tal bis zum höchsten Punkt 1458 m und von dort bis zum Ziel im nächsten Tal -1848 m. Für diese Fallstudie, wie sie für die Brems-erprobung prädestiniert ist, wurde zusätz-

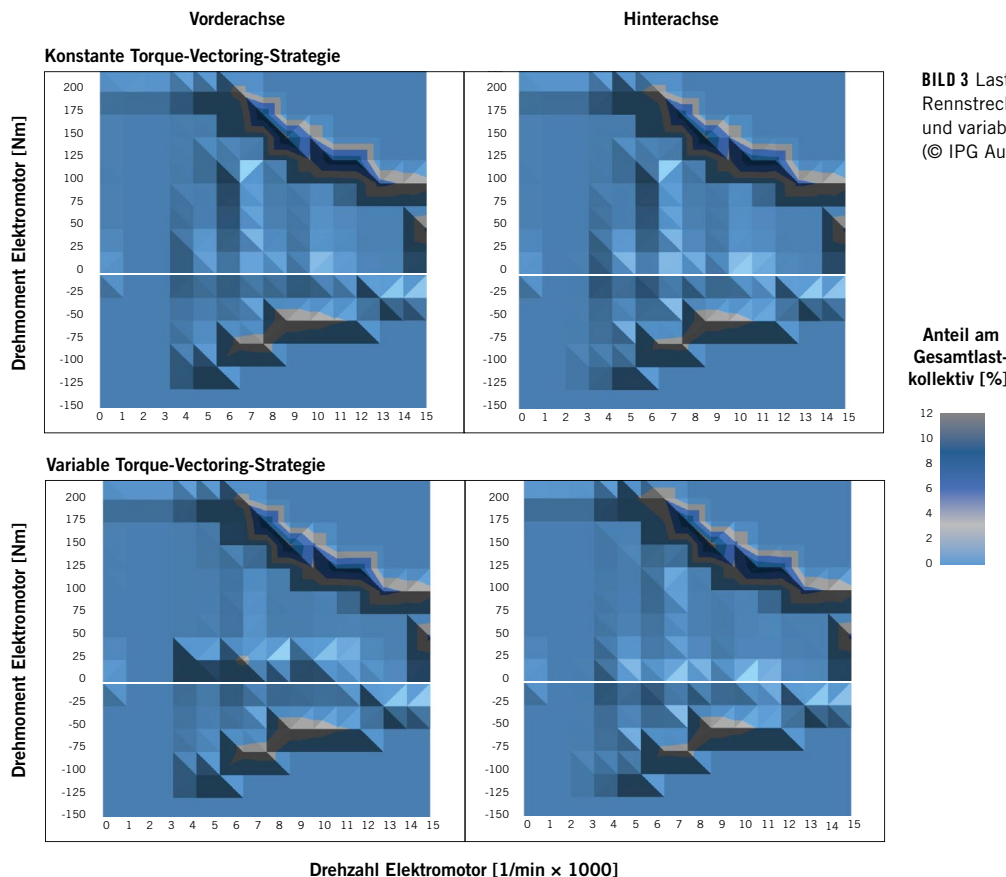


BILD 3 Lastpunktverteilungen für das Szenario Rennstrecke Nordschleife für eine konstante (oben) und variable (unten) Torque-Vectoring-Strategie (© IPG Automotive)

Jetzt
Ticket
kaufen

Weltleitmesse für industrielle Lackiertechnik

09.–12. April 2024
Messe Karlsruhe

www.paintexpo.de

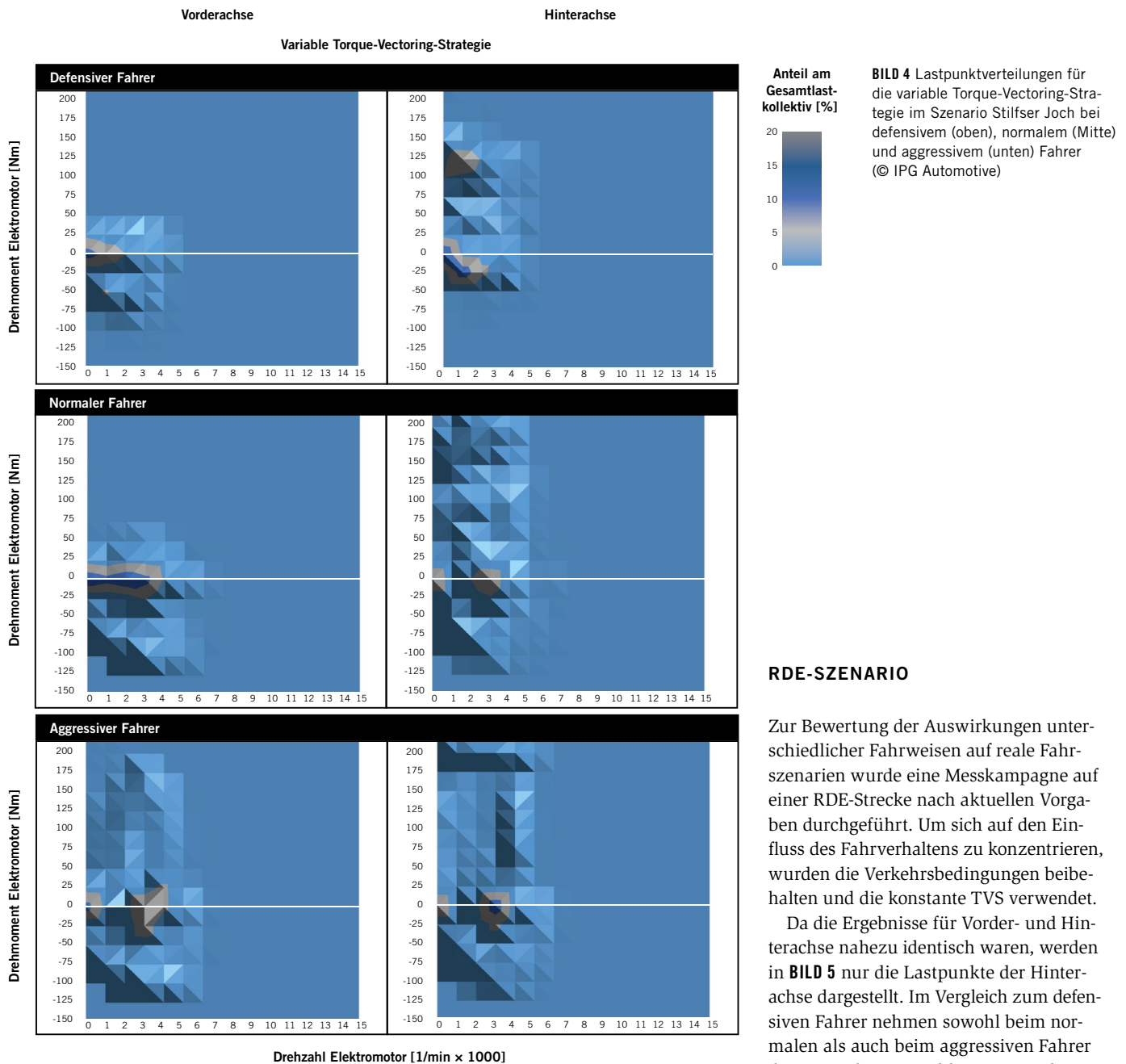


BILD 4 Lastpunktverteilungen für die variable Torque-Vectoring-Strategie im Szenario Stifser Joch bei defensivem (oben), normalem (Mitte) und aggressivem (unten) Fahrer (© IPG Automotive)

RDE-SZENARIO

Zur Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Fahrweisen auf reale Fahr-szenarien wurde eine Messkampagne auf einer RDE-Strecke nach aktuellen Vorgaben durchgeführt. Um sich auf den Einfluss des Fahrverhaltens zu konzentrieren, wurden die Verkehrsbedingungen beibehalten und die konstante TVS verwendet.

Da die Ergebnisse für Vorder- und Hinterachse nahezu identisch waren, werden in **BILD 5** nur die Lastpunkte der Hinterachse dargestellt. Im Vergleich zum defensiven Fahrer nehmen sowohl beim normalen als auch beim aggressiven Fahrer die Lasten beim Beschleunigen und Verzögern mit höheren Drehmomentwerten stark zu. Gleichzeitig bleibt der Anteil der Lastpunkte mit niedrigem Drehmoment auf einem ähnlichen Niveau.

STADTSZENARIO

Für das städtische Szenario wurden Streckenabschnitte des RDE-Szenarios verwendet und mit unterschiedlichen Verkehrsbedingungen kombiniert. Die Gesamtfahrstrecke betrug 8,3 km. Um sich auf die Verkehrseinflüsse zu konzentrieren, wurde nur die Fahrzeugvariante mit konstanter TVS vom normalen Fahrermodell gesteuert. Da die

lich das Fahrverhalten variiert. Simuliert wurde eine Abfahrt bei Vollbeladung mit starken Verzögerungen vor den Kehren und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf den Geraden, **BILD 4**. Die Fahrweise des defensiven und des normalen Fahrers zeigte jeweils einen deutlichen Unterschied in der Lastverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse. Zum Beschleunigen wurde die Vorderachse nicht benötigt, da das Drehmoment an der Hinterachse den Grenzwert nicht überschritt.

Die Vorderachse wurde daher primär zur Rekuperation genutzt. Ein Teil dieser

positiven Drehmomentlastpunkte wird durch Drehmomentwerte nahe Null repräsentiert. Der normale Fahrer nutzte im Vergleich zum defensiven Fahrer einen größeren Betriebsbereich. Der aggressive Fahrer erweiterte diesen Betriebsbereich und brachte vor allem die Hinterachse an ihre Drehmomentgrenze. Der Drehmomentbedarf war insgesamt höher, sodass die Vorderachse erhebliche zusätzliche Antriebsmomente aufbringen musste. Generell zeigt sich in diesem Szenario ein starker Einfluss des Fahrers auf die Lastpunktverteilung der variablen TVS.

Hinterachse

Konstante Torque-Vectoring-Strategie

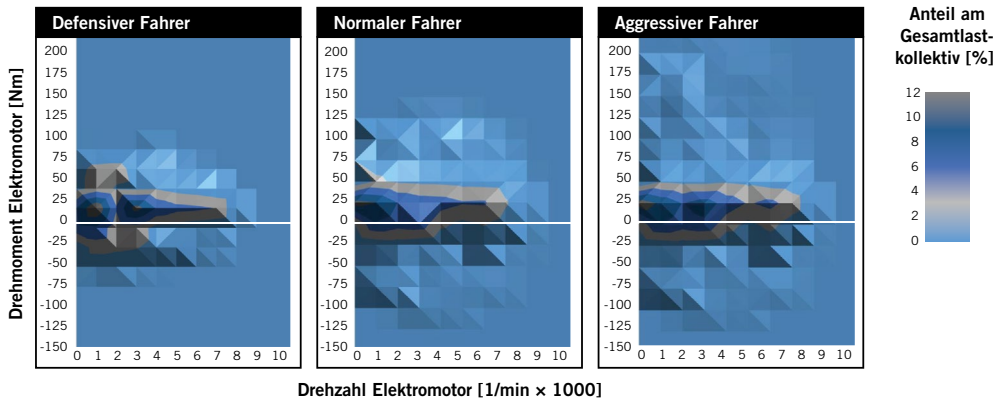


BILD 5 Lastpunktverteilungen für die RDE-Testfahrt bei konstanter Torque-Vectoring-Strategie (© IPG Automotive)

Hinterachse – Normaler Fahrer

Konstante Torque-Vectoring-Strategie

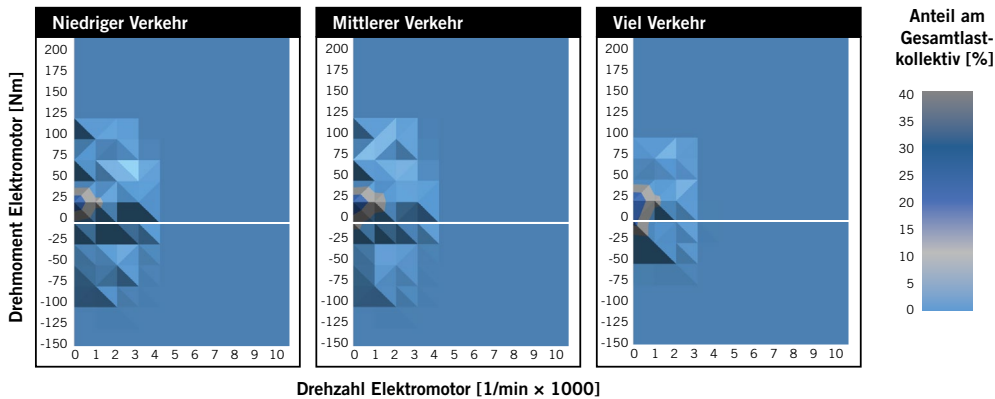


BILD 6 Lastpunktverteilungen für die innerstädtische Testfahrten bei unterschiedlicher Verkehrsdichte (© IPG Automotive)

Ergebnisse für Vorder- und Hinterachse nahezu identisch waren, sind lediglich die Lastpunkte der Hinterachse in **BILD 6** dargestellt.

Das Lastkollektiv weist im Vergleich zu den zuvor genannten Untersuchungen erwartungsgemäß niedrige Drehzahlbereiche auf. Der größte Anteil der Lastpunkte liegt bei allen Fahrweisen im Bereich von 25 Nm und bis zu 2000/min. Der Unterschied zwischen mittlerer und niedriger Verkehrsdichte ist gering. Die hohe Verkehrsdichte bewirkt eine Verkleinerung des Kennfelds, sodass nur noch Lastpunkte bis 3000/min Drehzahl und einem maximalen Drehmoment von 75 Nm erreicht werden.

FAZIT

Durch repräsentative Beispiele konnte IPG Automotive zeigen, dass mithilfe eines modellbasierten Simulationsansatzes

Lastdaten auf Gesamtsystemebene erzeugt werden können, ohne dass physische Fahrzeugprototypen benötigt werden. Die Ergebnisse belegen, dass virtuelle Messkampagnen zur Ermittlung der Lastverteilungen brauchbar sind, die zur Ableitung von Dauerhaltbarkeit-Auslegungszielen dienen.

Die eingeführte Methode des Smart-Durability-Engineerings beschreibt die Ansteuerung von Fahrzeugaktoren durch eine Software. Das Ziel dabei ist eine Erhöhung der Dauerhaltbarkeit sowie ein optimierter Leichtbau. Dafür ist es erforderlich, auch die Regelstrategie mit in den Prozess einzubeziehen. Im Artikel konnte gezeigt werden, dass die Simulation geeignet ist, um die darauf basierenden Lastdaten zu generieren. Diese Methode ist immer dann einsetzbar, wenn die Aktoren unterbestimmt sind und somit Freiheitsgrade ermöglichen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Johannesson, P.; Speckert, M. (Hrsg.): Guide to Load Analysis for Durability in Vehicle Engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013
- [2] Proier, P.; et al.: Innovative Optimierung von E-Antrieben auf Effizienz und Laufzeit. In: ATZextra Elektromobilität, Oktober 2021, S. 12-17
- [3] Erdős, G.; Takács, L.: Durability Assessment: A Virtual Proving Ground Approach. S. 119-128. In: Jármái, K.; Bolló, B. (Hrsg.): Vehicle and Automotive Engineering 2. Cham: Springer International Publishing, 2018
- [4] Speckert, M.; et al.: Automatisierte und um GEO-Daten angereicherte Auswertung von Messdaten zur Herleitung von Beanspruchungsverteilungen. DVM-Bericht 143 (2016), S. 165-180
- [5] Varga, B. O.; et al.: Electric and Plug-In Hybrid Vehicles. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 524 ff.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.atz-worldwide.com