



# ASSISTENZSYSTEM FÜR MEHR KRAFTSTOFFEFFIZIENZ

---

Porsche hat ein Fahrerassistenzsystem entwickelt, das die Umsetzung intelligenter Fahrstrategien erleichtert. InnoDrive kennt die technischen Eigenschaften des Fahrzeugs genau und integriert alle verfügbaren Informationen über die vorausliegende Fahrstrecke. Das System erzielt so bei mindestens gleicher Durchschnittsgeschwindigkeit Verbrauchersparnisse von durchschnittlich 10 %.

## AUTOREN



**PHILIP MARKSCHLÄGER**  
ist Entwicklungsingenieur  
Energiemanagement bei der  
Porsche AG in Weissach.



**HANS-GEORG WAHL**  
ist Doktorand des Instituts für  
Fahrzeugtechnik am Karlsruher  
Institut für Technologie (KIT) in  
Karlsruhe.



**DR. FRANK WEBERBAUER**  
ist Leiter Konzepte & Funktionen  
Energiemanagement bei der Porsche  
AG in Weissach.



**DR. MATTHIAS LEDERER**  
ist Leiter Energiemanagement bei  
der Porsche AG in Weissach.

## MOTIVATION

Der Kraftstoffverbrauch und damit die Wirtschaftlichkeit von Kraftfahrzeugen wandern als Kaufkriterium immer weiter an die Spitze. Dabei sind für Neuwagenkunden nicht nur rein rationale, also auf Kostenreduktion beschränkte Aspekte, sondern zunehmend auch emotionale Gesichtspunkte wie die soziale Akzeptanz entscheidend. Gerade Hersteller von Premiumfahrzeugen nehmen in der Entwicklung verbrauchsreduzierender Maßnahmen verstärkt eine Vorreiterrolle ein.

Bis Ende der 90er-Jahre konzentrierten sich die Automobilentwickler in Sachen Verbrauchsreduzierung hauptsächlich darauf, einzelne Fahrzeugantriebskomponenten (Verbrennungsmotor, Getriebe, Lager, etc.) bezüglich ihres Wirkungsgrades zu optimieren. Bis heute wurden so beachtliche Entwicklungsfortschritte erzielt, die sich auch künftig in weiteren evolutionären Verbesserungen fortsetzen werden.

Neben der reinen Antrieboptimierung rücken seit etwa zehn Jahren zunehmend Gesamtfahrzeugmaßnahmen wie Leichtbau, Rollwiderstandsreduzierung, Aerodynamik, neue Betriebsstrategien, beispielsweise Start/Stop, 12-V-Bordnetz-Rekuperation oder auch Thermo-Management, in den Fokus.

Effizienzmaßnahmen, die mit intelligenten Betriebsstrategien unnötigen Motorbetrieb vermeiden, wie Segeln (Freilauf mit Motor an [1]), Stop-on-the-move (Freilauf mit Motor aus) sowie die Mild-, Full- und Plug-in-Hybridisierung, setzen zunehmend ein. Bei optimaler Nutzung dieser Maßnahmen erschließen

sich erhebliche Verbrauchseinsparungen. Dies setzt jedoch voraus, dass der Fahrer deren Funktionsweise kennt und seine Fahrweise an das Fahrzeugverhalten adaptiert. Um diese Funktionen maximal effizient einsetzen zu können, ist vorausschauendes Fahren und eine genaue Kenntnis des Streckenverlaufs erforderlich. ❶ stellt den beschriebenen Fortschritt in der Entwicklung von Verbrauchsmaßnahmen dar.

Das Verbrauchs- und Komfortpotenzial lässt sich nur dann voll ausschöpfen, wenn Fahrzeugfunktionen und Streckenverlauf optimal aufeinander abgestimmt sind. Daher wächst der Wunsch nach einem Fahrerassistenzsystem, das die optimale Nutzung dieser Effizienzfunktionen automatisiert, indem es für den Kunden die Betriebs- und Fahrstrategieoptimierung übernimmt. Für ein solches Fahrerassistenzsystem ist die Verfügbarkeit prädiktiver Streckendaten mit hochgenauen Informationen bezüglich Geschwindigkeitsbegrenzungen, Fahrbahnsteigung und Kurvenkrümmungen unabdingbar.

Das in der Energiemanagement-Vor-entwicklung der Porsche AG in Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Fahrzeugsystemtechnik und dem FZI Forschungszentrum Informatik entwickelte und als Prototyp im Fahrzeug umgesetzte Fahrerassistenzsystem namens Porsche InnoDrive optimiert die Betriebs- und Fahrstrategie ganzheitlich und setzt sie mittels einer automatisierten Längsführung um. Die Besonderheit ist, dass es erstmals gelungen ist, einen echtzeitfähigen Ansatz mit einem mehrdimensionalen numerischen Optimierungsver-

1. Motor



Energiewandlung

2. Gesamtfahrzeug



Reduzierung der Fahrwiderstände

3. Betriebs- und Fahrstrategie



Interaktion Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

Heute

❶ Weiterentwicklung von Ansätzen zur Verbrauchsreduzierung

fahren zu realisieren, das neben dem Kraftstoffverbrauch auch die Fahrdynamik und den Komfort berücksichtigt. In Echtzeit werden bei diesem Konzept Beschleunigungs-, Konstantfahrt- und Verzögerungsvorgänge hinsichtlich des Gesamtoptimums intelligent geregelt [2].

Das System nutzt sämtliche zur Verfügung stehenden Fahrzeug- und Umfeldinformationen, um unter Einbezug der im Fahrzeug vorhandenen Effizienzmaßnahmen ein Minimum an Kraftstoffverbrauch zu erzielen, ohne dabei an Dynamik einzubüßen. Damit verringert es den Einfluss des Fahrers auf den Kraftstoffverbrauch und eröffnet zudem die Chance, die bisherige Diskrepanz zwischen Zyklus- und Kundenverbrauch zu minimieren.

**RANDBEDINGUNGEN IM FAHRZEUG**

Die Neuentwicklung geht deutlich über den heute in Serie befindlichen Radar-Abstandsregeltempomaten Adaptive Cruise Control (ACC) hinaus. Das Porsche-Konzept benötigt zusätzlich für die Ermittlung und Umsetzung einer optimalen Betriebs- und Fahrstrategie Zugriff auf Motor- und Getrieberegelgrößen sowie folgende Fahrzeugsensoren und Umfeldinformationen, ②:

- : GPS-System: Positionserfassung
- : prädiktive Streckendaten: Kenntnis des vorausliegenden Streckenverlaufs
- : Kamera: Erkennung von vorausfahrenden Fahrzeugen und Verkehrszeichen sowie Fahrspurdetektion
- : Radar: Fahrverhalten vorausfahrender Fahrzeuge
- : Fahrzeugsensorik: Ermittlung von Straßenverhältnissen, Beladung, Fahrzeugzustand und Wetter

- : Fahrzeugcharakteristik: echtzeitfähiges Fahrzeug- und Verbrauchsmodell zur Online-Berechnung des Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrades
  - : Fahrprofil: Berücksichtigung des Fahrerwunschs, zum Beispiel Dynamik, Komfort, Effizienz etc.
- Das System fusioniert und verarbeitet die oben genannten Informationen in einer vorausschauenden sowie maximal effizienten automatisierten Längsführung. Dabei berücksichtigt es alle zukünftig im realen Fahrbetrieb möglichen Betriebszustände, abhängig von den im Fahrzeug verfügbaren Funktionen:
- : Beschleunigung
  - : Konstantfahrt
  - : Schubabschaltung
  - : Segeln/Freilauf mit Motor an
  - : Stop-on-the-move/Freilauf mit Motor aus
  - : Rekuperation (Mild-, Full- beziehungsweise Plug-in-Hybrid, E-Fahrzeug)
  - : E-Fahren (Full- beziehungsweise Plug-in-Hybrid, E-Fahrzeug).

**FUNKTIONSBESCHREIBUNG**

Maximal effizientes Fahren und kundennahes und markttypisches Anpassen der Dynamik bei einer harmonischen Fahrweise sind die geforderten Ziele, denen sich das System stellt. Es löst diesen Zielkonflikt, indem alle entscheidenden Größen in eine neue Zielfunktion einfließen, deren Lösung die Optimalität unter gegebenen Randbedingungen gewährleistet. Nur wenn alle zur Verfügung stehenden Informationen an einer Stelle zusammengeführt und verarbeitet werden, kann ein Fahrerassistenzsystem sowohl zur Entlastung als auch zu einem höheren Fahrspaß bei

gleichzeitig niedrigerem Verbrauch führen.

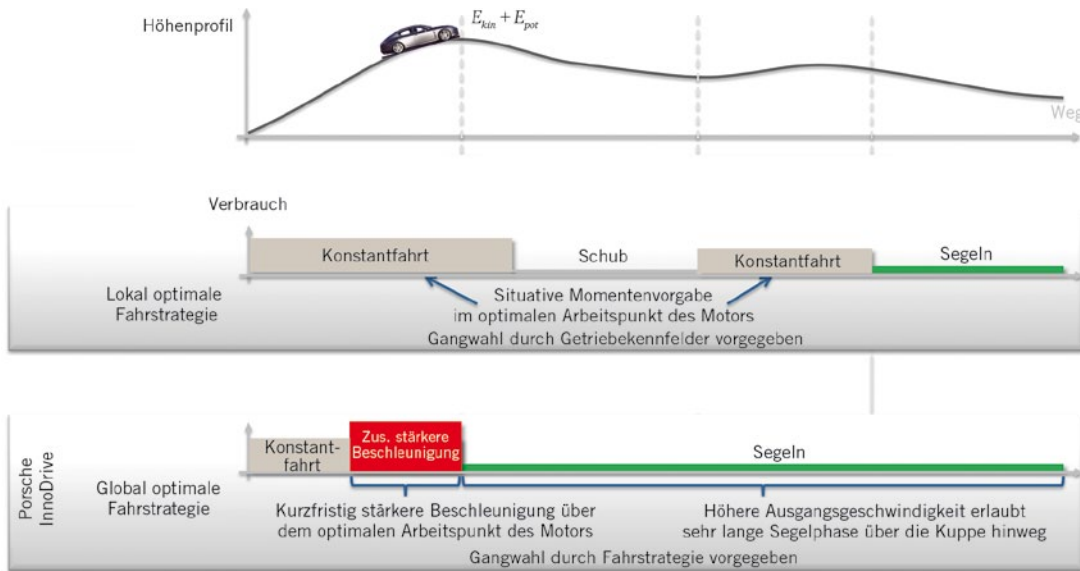
Um in jeder Situation die maximal effiziente Fahrweise zu gewährleisten, basiert der Ansatz auf der Optimierungsmethode der dynamischen Programmierung nach Bellman [3]. Der ideale Betriebszustand wird demnach nicht fallspezifisch gewählt. Der Algorithmus sucht aus allen möglichen Betriebszuständen in einem relevanten vorausliegenden Horizont die Abfolge von Zuständen heraus, die unter den Randbedingungen gesamtoptimal sind.

③ zeigt an einem Fallbeispiel einer Fahrstrecke mit wechselnden Steigungs- und Gefälleanteilen die Vorteile des globalen Optimierungsansatzes bei Porsche InnoDrive gegenüber einer Fahrstrategie, die fallspezifisch Beschleunigungs-, Konstantfahrt- und Verzögerungsvorgänge einleitet. Porsche InnoDrive nutzt über den gesamten Vorausschauhorizont die kinetische und potenzielle Energie des Fahrzeugs voll aus. Die vorausschauende „Investition“ in zusätzliche kinetische Energie vor dem ersten Gefälle zahlt sich dort aus. Sie ermöglicht eine sehr lange Segelphase über den kleineren Anstieg hinweg, die verbrauchsgünstiger als eine Mischung aus Schub- und Zugphasen ist. Insgesamt kann der Streckenverbrauch also durch eine global optimierte Fahrstrategie gegenüber einer ereignisbasierten Strategie bei gleicher Fahrzeit deutlich reduziert werden.

Die Suche nach dem globalen Optimum nach Bellman wird in der Literatur fast ausschließlich als Referenz und zur Bewertung von heuristischen Verfahren herangezogen, da der Algorithmus in seiner ursprünglichen Form für Echtzeitanwendungen zu rechenintensiv ist.



② Fahrzeugsensorik und Umfeldinformationen für Porsche InnoDrive



③ Fallbeispiel zur Verdeutlichung des globalen Optimierungsansatzes bei Porsche InnoDrive

Der Algorithmus wurde jedoch durch intelligente Reduzierungen des relevanten Optimierungsraums für eine echtzeitfähige Anwendung angepasst, worauf im Folgenden genauer eingegangen werden soll.

Voraussetzung für eine schnelle Suche nach einem optimalen Fahrverlauf – im Weiteren als Trajektorie bezeichnet – ist die intelligente Einschränkung des Suchhorizonts. Das Fahren auf der Straße ist durch eine Vielzahl von physikalischen Randbedingungen beschränkt, die die Wahl der Geschwindigkeiten eingrenzen, wodurch irrelevante Bereiche von vorne herein ausgeschlossen werden können.

Dazu wird ein Geschwindigkeitsband generiert, das mit einer maximalen und minimalen Geschwindigkeit den Optimierungsraum über die Strecke aufspannt.

In ④ ist exemplarisch ein Geschwindigkeitsband dargestellt.

Unterschiedliche Dynamik- aber auch Komfortfaktoren beschreiben das Geschwindigkeitsband und helfen damit, den Optimierungsraum sinnvoll zu reduzieren. Neben der gesetzlichen Höchstgeschwindigkeit schränken enge Kurven durch eine maximal tolerierte Querschleunigung das Band ein. An einem Schild zur Geschwindigkeitserhöhung ist die Längsbeschleunigung, beim nächsten Ortsschild eine vom Fahrerwunsch abhängige maximale Verzögerung einzuhalten. Falls die Straße aufgrund ihres Steigungsverlaufs nicht einsehbar ist, greift die Kuppenerkennung, die abhängig von der Einsehbarkeit der vorausliegenden Strecke die Maximalgeschwindigkeit reduziert.

Die untere Geschwindigkeitseinschränkung ermöglicht ein weiteres Ausklammern von Zuständen, die unter dem Dynamikaspekt nicht relevant sind. Der in ④ dargestellte weiße Bereich zwischen der oberen und unteren Geschwindigkeitseinschränkung stellt einen Optimierungsraum dar, in dem nun ein rasterförmig diskretisiertes Netz von möglichen Geschwindigkeitsstufen und Gängen aufgebaut wird. Beim Aufbau dieser Rasterpunkte, durch die die unterschiedlichen Trajektorien verlaufen, werden nur solche Knoten in Betracht gezogen, die durch das Fahrzeug an diesem Streckenpunkt erreichbar sind. Dazu sind ein präzises Fahrzeugmodell sowie eine genaue Fahrwiderstandsabschätzung unabdingbar. Weitere Knoten, die nicht erreichbar sind, werden ausge-

Weltweit beste Verbindungen



**NORMA GROUP**  
www.normagroup.com

Die NORMA Group bewegt sich in den Spitzenregionen des weltweiten Marktes für Verbindungs- und Befestigungstechnologien. Dank der vielfältigen Erfahrung ihrer internationalen Gesellschaften hat sich die Unternehmensgruppe als anerkannter Spezialist, Problemlöser und innovativer Entwicklungspartner etabliert. Die Vielzahl unserer qualitativ hochwertigen Produkte ermöglicht nahezu jede denkbare Verbindung mediumführender Leitungen und Rohre. Schließlich wissen wir, dass der Erfolg des Ganzen an jede einzelne Verbindung gekoppelt ist.

ABA

NORMA

BREEZE

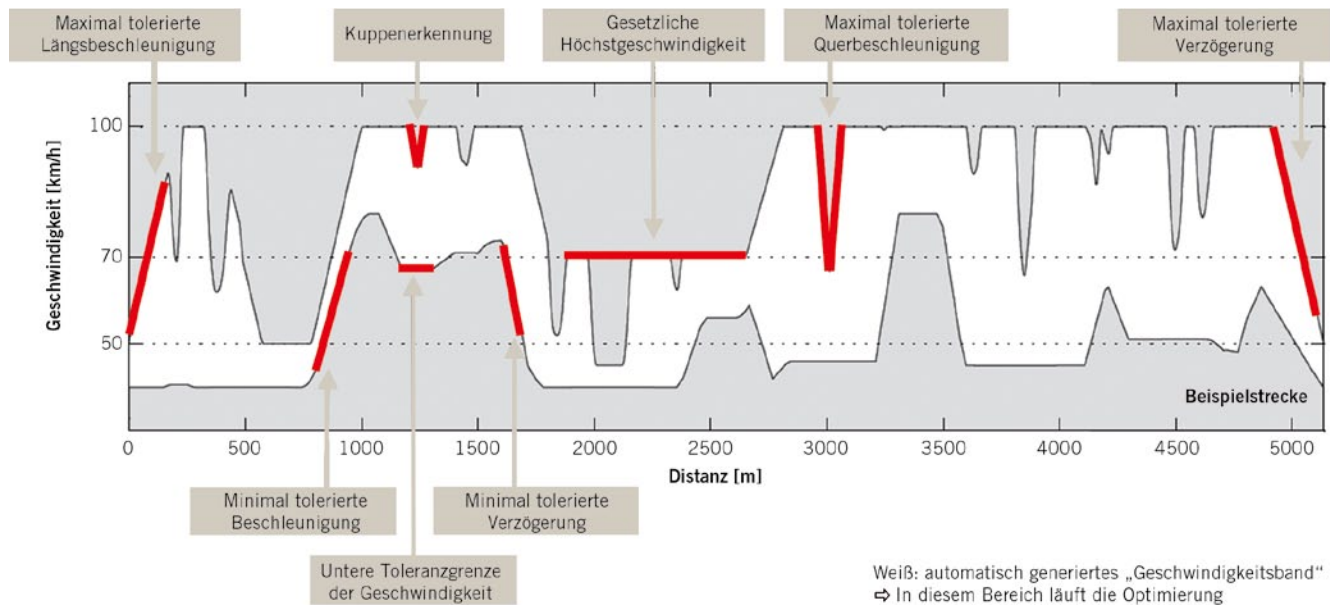
SERFLEX

serratub

TERRY

Torca

Clamp-All



4 Erzeugung eines Geschwindigkeitsbands zur Eingrenzung des Optimierungsraums

schlossen und der Optimierungsraum auf diejenigen Knoten reduziert, durch die eine mögliche Trajektorie verlaufen kann, 5.

Damit durch die dynamische Programmierung eine Rückwärtssuche der optimalen Trajektorie durch die Knoten möglich ist, müssen für alle Knoten Kosten festgelegt werden. Da bei Porsche InnoDrive nicht nur die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs, sondern auch die vom Fahrer gewünschte Dynamik und die Fahrbarkeit eine Rolle spielen, wurde folgende Kostenfunktion gewählt, Gl. 1:

GL. 1	$J = M + \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 \dots$
-------	---

$M$  stellt den Kraftstoffverbrauch dar, während die Dynamik zum Beispiel in Form von einer Geschwindigkeitsabweichung von der möglichen Maximalgeschwindigkeit sowie andere Faktoren  $C$  – wie beispielsweise Komfort – über einen Gewichtungsfaktor  $\beta$  in die Gesamtkosten eingerechnet werden können.

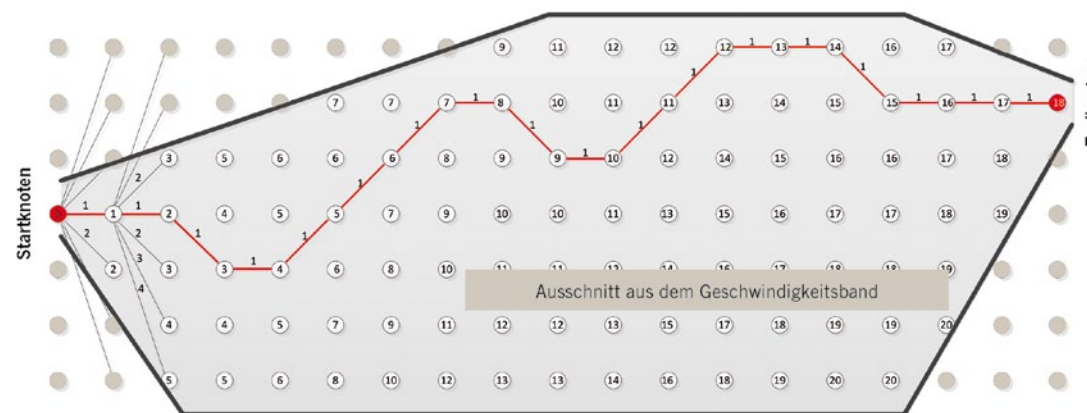
Eine Parametrierung der Kostenfunktion ermöglicht die Auswahl beliebig vieler Dynamikstufen und garantiert die auf den Kraftstoffverbrauch bezogen effizienteste Geschwindigkeits- und Gangtrajektorie. Die optimale Reihenfolge von Betriebszuständen kann aus der Trajektorie extrahiert werden. Diese Zustände sind wiederum über Steuergrößen wie Momentenverteilung, Gangwahl, Brems-

druck etc. definiert und können so im Fahrzeug eingeregelt werden.

**ERGEBNISSE UND KUNDENNUTZEN**

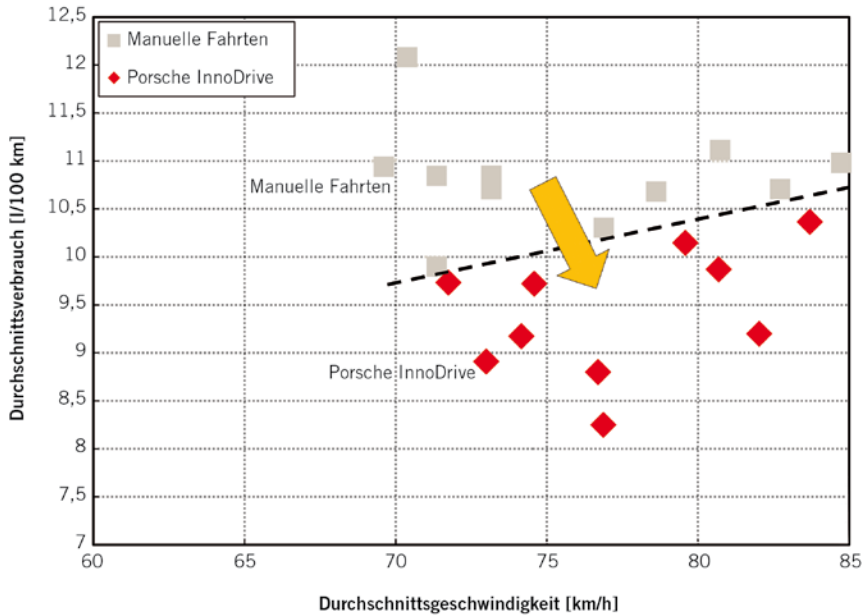
Porsche InnoDrive kennt die technischen Eigenschaften des Fahrzeugs genau und integriert alle verfügbaren Informationen über die vorausliegende Fahrstrecke. Das System erzielt so bei mindestens gleicher Durchschnittsgeschwindigkeit Verbrauchersparnisse von durchschnittlich 10 %.

Diese Zielsetzung konnte auch während einer Presseveranstaltung im Mai 2011 validiert werden, bei der Journalisten ein konventionell angetriebenes Fahrzeug zunächst selbst und anschließend mit aktivierter Funktion um eine abwechslungsreiche Teststrecke im Raum



5 Einschränkung der Punkte im Geschwindigkeitsraster und mögliche Teiltrajektorie

Manuelle Fahrten vs. Fahrten mit Porsche InnoDrive  
 Probanden: Journalisten der internationalen Automobilpresse



6 Reales Einsparpotenzial von Porsche InnoDrive (gemessen im Mai 2011)

Weissach fahren. 6 zeigt die dabei gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten und -verbräuche.

Die Schere zwischen Norm- und Realverbrauch kann also deutlich verkleinert werden, ohne dass der Fahrer Kompromisse bei der Fahrzeit hinnehmen muss. Gleichzeitig bietet das Assistenzsystem durch die automatische Anpassung der Geschwindigkeit an die Straßentopografie einen zusätzlichen Komfortaspekt. Der von Porsche entwickelte Optimierungsansatz bewertet über den gesamten zur Verfügung stehenden Vorausschauhorizont die Fahrbarkeit des gewählten Geschwindigkeitsverlaufs und gewährleistet so auch auf dynamischen und abwechslungsreichen Strecken eine harmonische Fahrweise. Für einen denkbaren Serieneinsatz ermöglicht das System dem Fahrer des sportlichen Premiumsegments neben täglich erlebbarer Effizienz auch die individuelle Einstellung der gebotenen Dynamik – unter den gewählten Randbedingungen immer maximal effizient.

## AUSBLICK UND KÜNFTIGE HANDLUNGSFELDER

Das aktuelle Konzept von Porsche InnoDrive basiert weitestgehend auf einem statischen Vorausschauhorizont.

Das heißt, die Optimierung erfolgt auf Basis von unveränderlichen Navigationsdaten. Lediglich über Kamerasensorik und Radar werden aktualisierte Daten in den Algorithmus integriert. Insbesondere veraltete Kartendaten führen zu Einschränkungen bezüglich Funktionskomfort, da das System dann auf Basis falscher Daten optimiert und nur kurzfristig im Rahmen der Sensorreichweite von Kamera beziehungsweise Radar auf die korrekten Daten reagieren kann. Im Fall von Änderungen an der Straßenführung oder Topologie ist dann ein Fahrereingriff notwendig, da die Sensorik diese Änderungen nur teilweise identifizieren kann. Um die Aktualität der Kartendaten sicherzustellen, werden zukünftig Updates der Navigationsdaten unabdingbar sein. Darüber hinaus ist jedoch auch eine weitere Vernetzung des Fahrzeugs hilfreich, die häufig unter der Bezeichnung Car-to-Infrastructure- oder Car-to-Car-Kommunikation (zusammengefasst C2X) in der Literatur beschrieben wird.

Mit der Einbindung von C2X-Informationen wird es zukünftig möglich sein, aus dem statischen einen dynamischen Vorausschauhorizont zu machen. So können explizite Geschwindigkeitsvorgaben aus Verkehrsleitsystemen genauso wie implizite Geschwindigkeitsvorgaben durch Verkehrsaufkommen in die Vor-

ausschau integriert werden. Dies wird einerseits den Komfort verbessern, zum anderen aber auch das Effizienzpotenzial bei dynamischen Änderungen des Geschwindigkeitslimits erhöhen. Insbesondere Hybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge profitieren davon, wenn Porsche InnoDrive mit großem Vorausschauhorizont den Bereich des elektrischen Fahrens ausweiten kann. So können Betriebs- und Fahrstrategie optimal miteinander vernetzt werden, um dem Fahrer beispielsweise zu einem gewünschten Streckenpunkt einen Mindestladezustand der Batterie und damit einen Nullemissionsbetrieb gewährleisten zu können.

Mit der stärkeren Vernetzung des Fahrzeugs mit der Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern wird es dann auch möglich sein, die Ampelsignalphasen sowie stehende Fahrzeuge in die Geschwindigkeitsbandgenerierung mit einzubeziehen und entsprechend auch innerstädtische Fahrten mit Porsche InnoDrive zu ermöglichen. Vielleicht ist es dann in einigen Jahren möglich, durch eine Großstadt wie Stuttgart zu fahren, ohne ein einziges Mal anhalten zu müssen.

## LITERATURHINWEISE

- [1] Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG: Porsche Technologie Lexikon – Segeln. <http://www.porsche.com/microsite/technology/default.aspx?pool=germany&howSingleTechterm=PTSegeln>, 2012
- [2] Roth, M.; Radke, T.; Lederer, M. et al.: Porsche InnoDrive – An Innovative Approach for the Future of Driving, 20<sup>th</sup> Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2011
- [3] Bellmann, R. E.: Dynamic Programming. Princeton University Press, 1957



DOWNLOAD DES BEITRAGS  
[www.ATZonline.de](http://www.ATZonline.de)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
 order your test issue now:  
[springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)