Anwenderbericht

Praktischer Einsatz der mobilen Datenerfassung CuroCon*trol*®Mx im Rahmen von RDE-Messfahrten

Teil 3: Messfahrten mit einem Fahrzeug des Typs Mercedes C350e

Motivation

Die Weiterentwicklung und Zertifizierung von PKW-Abgas- und Verbrauchswerten erfolgt bislang primär auf Prüfständen. Dort lassen sich reproduzierbare Messergebnisse unter Laborbedingungen erzielen - hochpräzise und geeignet zum Vergleich mit anderen Fahrzeugen. Soweit die Theorie.

In der Praxis ist festzustellen, dass es zunehmend schwieriger wird, die auf dem Prüfstand ermittelten Kraftstoffverbräuche und Emissionen auf die Straße zu übertragen.

So ist es nur konsequent, dass der "Optimierung" auf dem Prüfstand jetzt die objektive Messung auf der Straße folgt. Gemäß EU-Beschluss trat mit Wirkung zum 01.09.2017 das Real Driving Emissions (RDE) Verfahren in Kraft, welches die Emissionen im praktischen Fahrbetrieb ermittelt.

Nach den Messfahrten mit Vollhybridfahrzeugen des Typs VW Passat Variant GTE im November 2016 und BMW 225xe im April/Mai 2016, erfolgten inzwischen weitere Untersuchungen mit einem Fahrzeug des Herstellers Mercedes.

Testfahrzeug

ElringKlinger Motortechnik GmbH (EKM) testete jetzt ein drittes Vollhybridfahrzeug, diesmal vom Typ Mercedes C350e. Das Fahrzeug stellte wieder CuroCon GmbH aus ihrem Fuhrpark zur Verfügung.

Fahrzeugeckdaten:
Kraftstoffverbrauch (kombiniert) 2,4-2,1l/100 km zzgl. 13,8-11,7 kWh/100 km, CO_2 kombiniert 55-49 g/km; Verbrennungsmotor 155 kW @ 5.500/min, 350 Nm @ 1.200-4.000/min; Elektromotor 60 kW @ 2.000/min; Systemleistung 205 kW, Systemdrehmoment 500 Nm; Traktionsbatterie 6,4 kWh (brutto)

Bild 1: Das Testfahrzeug Mercedes C350e

Messtechnische Ausrüstung

Das Testfahrzeug wurde mit einem mobilen Emissionsmessgerät (-> Portable Emission Measuring System - PEMS) sowie einer Messbox CuroCon*trol*®Mx und zahlreichen Zusatz-Sensoren ausgerüstet.

CuroCon*trol*®Mx dient als zentrale, mobile Echtzeit-Messwerterfassung und speichert alle erfassten Daten mit jeweiligem Zeitstempel ab. Dies beinhaltet insbesondere folgende Daten:

- Standard-Messkanäle aus der OBD-Schnittstelle
- Erweiterte fahrzeugspezifische Messkanäle aus der OBD-Schnittstelle
- sämtliche Messdaten des mobilen Emissionsmessgeräts (PEMS)
- GPS-Daten zur Fahrstrecke
- Informationen zur Fahrzeugeinstellung (z.B. Gang und Fahrmodus)
- Zusätzliche fahrzeugspezifisch nachgerüstete Sensorik (z.B. Temperatursensoren im Abgasstrang) für die Durchführung der Fahrversuche

Jedes Fahrzeug kann mit seiner spezifischen Konfiguration in der Typverwaltung abgelegt werden. Die Anzahl hinterlegter Datensätze ist nicht limitiert. Jeder Datensatz kann darüber hinaus als Vorlage für geänderte Fahrzeugabstimmungen oder andere Versuchsfahrzeuge verwendet werden.

Die im Mercedes C350e eingesetzte Ausrüstung entspricht den bereits für die vorherigen Messfahrten mit einem VW Passat Variant GTE und einem BMW 225xe verwendeten Komponenten.

Bild 2: Anbringung des mobilen Emissionsmessgeräts auf der Anhängerkupplung

Bild 3: Messsystem CuroCon*trol*®Mx (rechts) für das zentrale Datenmanagement

Bild 4: Innenraum des Testfahrzeugs mit zusätzlichem Bildschirm zur Visualisierung der Messdatenerfassung

Fahrstrecke und Durchführung

Die Fahrstrecke beginnt bei EKM, Standort Idstein und umfasst zunächst Teil 1, bestehend aus 24 km Stadtfahrt. Hierbei werden 2 große und 2 verkürzte Stadtrunden absolviert. Es schließt sich die Überlandfahrt über Landes- und Bundesstraßen, einschließlich zweier Ortsdurchfahrten, in Richtung Norden bis zur BAB-Anschlussstelle Limburg-Süd an (Teil 2). Dort beginnt der Autobahn-Streckenabschnitt auf der A3 in Richtung Süden (Teil 3). Nach insgesamt 85,9 km endet die Messdatenaufnahme an der Autobahnabfahrt Wiesbaden/Niedernhausen. Streckenabschnitte mit Geschwindigkeitsbegrenzungen auf unter 90 km/h sowie die beiden Ortsdurchfahrten wurden konform zur EU-Verordnung 2016/427 in die Messfahrt integriert.

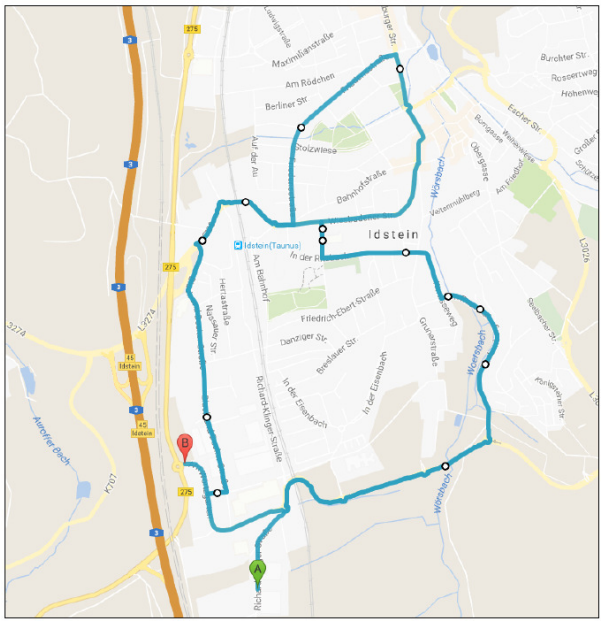

Bild 5: Streckenführung für die RDE-Messfahrten (hier: Teil 1 – Stadtabschnitt)
Die Strecke beginnt am Werkstor der ElringKlinger Motortechnik GmbH ("A")
und endet an der Auffahrt zur Bundesstraße 275 ("B")

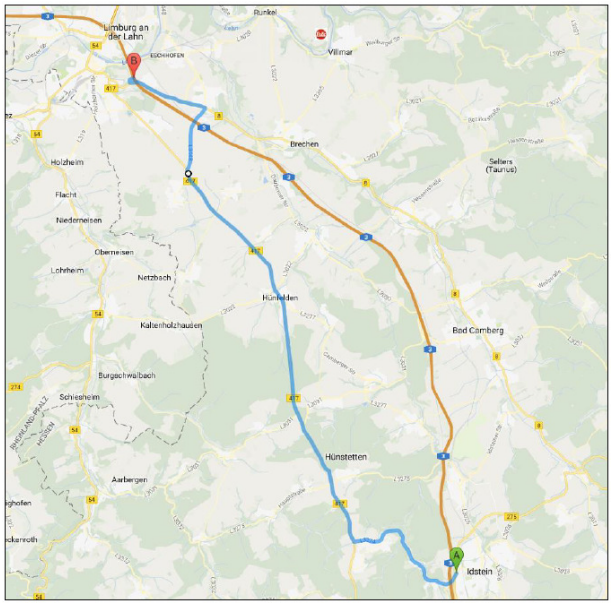

Bild 6: Streckenführung für die RDE-Messfahrten (hier: Teil 2 – Überlandabschnitt)
Die Strecke beginnt an der Auffahrt zur B275 ("A") und endet auf der B8 an der
Auffahrt zur BAB3, Anschlussstelle Limburg-Süd ("B")

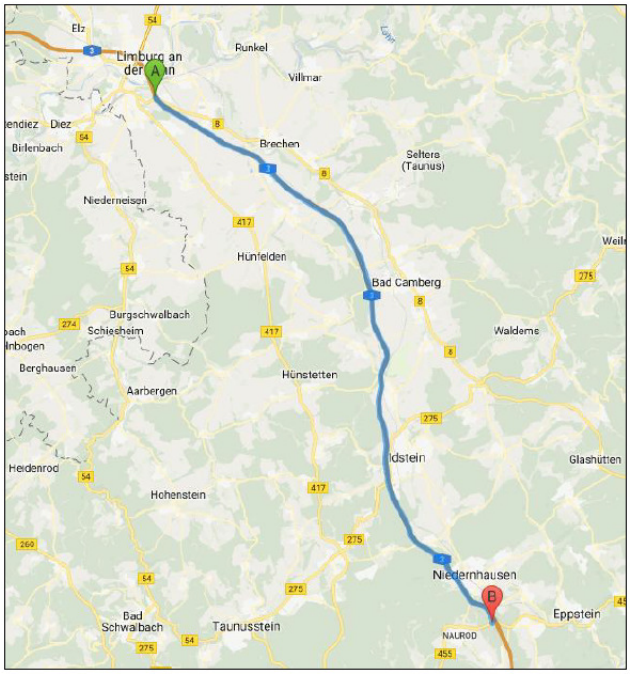

Bild 7: Streckenführung für die RDE-Messfahrten (hier: Teil 3 – Autobahnabschnitt)
Die Strecke beginnt an der Anschlussstelle Limburg-Süd zur BAB3 ("A"), Richtung Süden und endet in Höhe der Anschlussstelle WI/Niedernhausen ("B")

Die Messfahrten wurden im Zeitraum 22.08. bis 08.09.2017 jeweils an gleichen Wochentagen mit derselben Fahrzeugbesatzung und zur selben Tageszeit in allen verfügbaren Fahrmodi und Antriebseinstellungen absolviert. Mit Ausnahme des PEMS wurde die gesamte messtechnische Ausrüstung innerhalb des Fahrzeugs platziert.

Bild 8: Einsatzbereites Testfahrzeug

Da sich das PEMS und die Abgasführung im Totwassergebiet hinter der Heckklappe befinden, sollte der Einfluss auf die Aerodynamik gering sein. Wie bereits bei den Messungen mit dem VW Passat GTE und BMW 225xe (PEMS im Fahrzeuginnenraum, Heckklappe für die Abgasführung leicht geöffnet) wurde die aerodynamische Änderung daher nicht weiter berücksichtigt.

Antriebseinstellungen

Der Mercedes C350e verfügt über 4 Fahrmodi sowie zusätzlich 3 Fahrprogramme. Über diese Einstellungen lassen sich sowohl der Einsatz des Elektromotors als auch die Fahrcharakteristik und die Nebenverbraucher beeinflussen. Im Folgenden werden die Besonderheiten der einzelnen Modi und Fahrprogramme beschrieben.

Fahrmodi
Es stehen die 4 Betriebsarten HYBRID, E-Modus, SAVE und CHARGE als elektrischer Fahrantrieb bzw. zur elektrischen Unterstützung zur Verfügung.

HYBRID:
In diesem Modus wird vorzugsweise der Elektroantrieb genutzt. Die hinterlegte Betriebsstrategie berücksichtigt auch ein im Navigationssystem eingegebenes Fahrziel, um z.B. in einem innerstädtischen Zielgebiet möglichst elektrisch fahren zu können; entsprechend wird ein Teil des elektrischen Energievorrats im vorausgehenden Fahrabschnitt zurückgehalten. Bei stärkerer Beschleunigung schaltet sich grundsätzlich der Verbrennungsmotor zu. Ebenso springt bei SOC (State of Charge = Ladezustand Akku in Prozent) < 20% der Verbrennungsmotor bereits bei geringerer Beschleunigung an.

E-Modus:
In diesem Fahrmodus wird soweit irgend möglich der rein elektrische Antrieb ohne Zuschalten des Verbrennungsmotors genutzt. Dies erfolgt auch bei zügiger Beschleunigung (nicht bei Kickdown) und bei Konstantfahrt bis 130 km/h, SOC > 10% vorausgesetzt. Bei SOC < 10% schaltet der Antrieb automatisch in den Modus SAVE.

SAVE:
Durch Auswahl des Modus SAVE kann der Fahrer den Ladezustand der Traktionsbatterie auf dem aktuellen Stand halten. Entsprechend wird überwiegend mit dem Verbrennungsmotor angetrieben. Bei SOC < 10% wird solange geladen, bis SOC = 20% wieder erreicht ist.

CHARGE:
Durch Auswahl des CHARGE-Modus kann der Fahrer die Traktionsbatterie wieder bis SOC = 100% aufladen. Danach wechselt der Antrieb automatisch in den Modus SAVE. Im CHARGE-Modus ist der Elektroantrieb nicht verfügbar, bei stehendem Fahrzeug wird der Verbrennungsmotor nicht abgeschaltet.

In jedem der 4 Fahrmodi erfolgt beim Gaswegnehmen eine geringe Rekuperation. Manuell wählbare oder automatische Rekuperationsstufen sind nicht vorhanden. Bei Betätigung des Bremspedals wird verstärkt rekuperiert und ergänzend die Betriebsbremse eingesetzt.

Fahrprogramme
Zur Vorgabe einer direkteren, leistungsorientierten Gaspedalkennlinie sowie geänderter Lenkungs-, Federungs- und Schaltcharakteristik stehen die 3 Fahrprogramme C (Komfort), ECO und S (Sport) zur Verfügung.

Fahrprogramm Komfort:
Dies ist der Standard-Fahrmodus.

Fahrprogramm ECO:
Im Fahrmodus ECO werden die Motor- und Getriebecharakteristik sowie die Einstellung der Klimaanlage im Hinblick auf größtmögliche Ökonomie parametriert.

Fahrprogramm SPORT:
Grundsätzlich läuft der Verbrennungsmotor in diesem Modus permanent, das Drehzahlniveau liegt höher und das Getriebe schaltet früher zurück. Außerdem ist die Lenkcharakteristik direkter.

Die gewählten Antriebseinstellungen wurden mit Hilfe des Messsystems CuroCon*trol*®Mx permanent festgehalten und mit Zeitstempel parallel zu den übrigen Messdaten abgespeichert.

Messergebnisse

Nach Abschluss der Messfahrten wurden die Rohdaten zur Auswertung aufbereitet. Hierbei wurden im Wesentlichen folgende Erkenntnisse gewonnen:

Fahrmodus	*Anzahl V-Motor an [-]*	*Dauer V-Motor an [sec]*
HYBRID (SOC 100%)	73	2006
E-MODE(SOC 100%)	62	2035
CHARGE (SOC 10%)	86	4548
SAVE (SOC 100%)	138	3092
HYBRID + Fahrprogramm S (SOC 100%)	1	6245

Bild 9: Startvorgänge und Motorlaufzeit in den einzelnen Betriebsmodi

Im HYBRID-Modus führt die hinterlegte Betriebsstrategie zu der insgesamt kürzesten Zuschaltzeit des Verbrennungsmotors (ca. 1/3 der Gesamtfahrzeit), sogar noch einige Sekunden weniger als im E-Modus. Gleichzeitig erfolgen mehr (aber eben kürzere) Zuschaltvorgänge des Verbrennungsmotors.

Im Gegensatz dazu läuft der Verbrennungsmotor im HYBRID-Modus, mit zusätzlicher Anwahl des Fahrprogramms S, während der gesamten Messfahrt durch.

Die mit Abstand meisten Zuschaltvorgänge des Verbrennungsmotors erfolgen im Modus SAVE, trotz vollgeladener Traktionsbatterie. Die kumulierte Zuschaltdauer des Verbrennungsmotors beträgt hier ca. 50% der Gesamtfahrzeit.

Im CHARGE-Modus, bei SOC = 10% zu Fahrtbeginn, liegen sowohl die Anzahl der Zuschaltvorgänge als auch die Gesamtlaufzeit des Verbrennungsmotors etwa in der Mitte zwischen HYBRID-/SAVE- und E-Modus, jeweils bei voller Traktionsbatterie zu Beginn der Messfahrt.

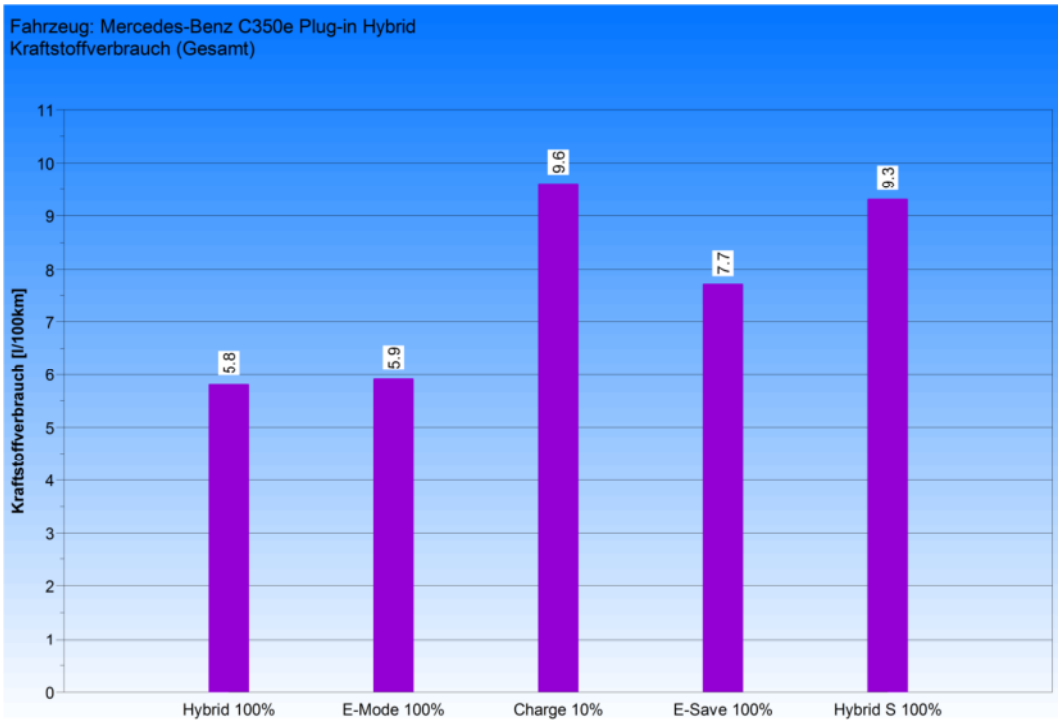

Bild 10: Kraftstoffverbrauch in allen Betriebsmodi auf der Gesamtstrecke

Der reine Kraftstoffverbrauch ist sehr stark von den gewählten Antriebseinstellungen abhängig. Der Verbrauch im HYBRID- und im E-Modus ist nahezu gleich. Demgegenüber liegt der Verbrauch in allen anderen Modi um ca. 30 - 60% höher, weshalb diese Modi nur im Ausnahmefall genutzt werden sollten. Dies gilt auch für den CHARGE-Modus (SOC_{Start}=10%): Zwar entspricht die hier während der Gesamtstrecke erzeugte und in die Traktionsbatterie geladene elektrische Energie (SOC_{Ziel}=100%) weiteren ca. 15 - 20 km rein elektrischer Fahrtstrecke, dies rechtfertigt bzw. kompensiert energetisch betrachtet aber nur einen Mehrverbrauch von ca. 20%.

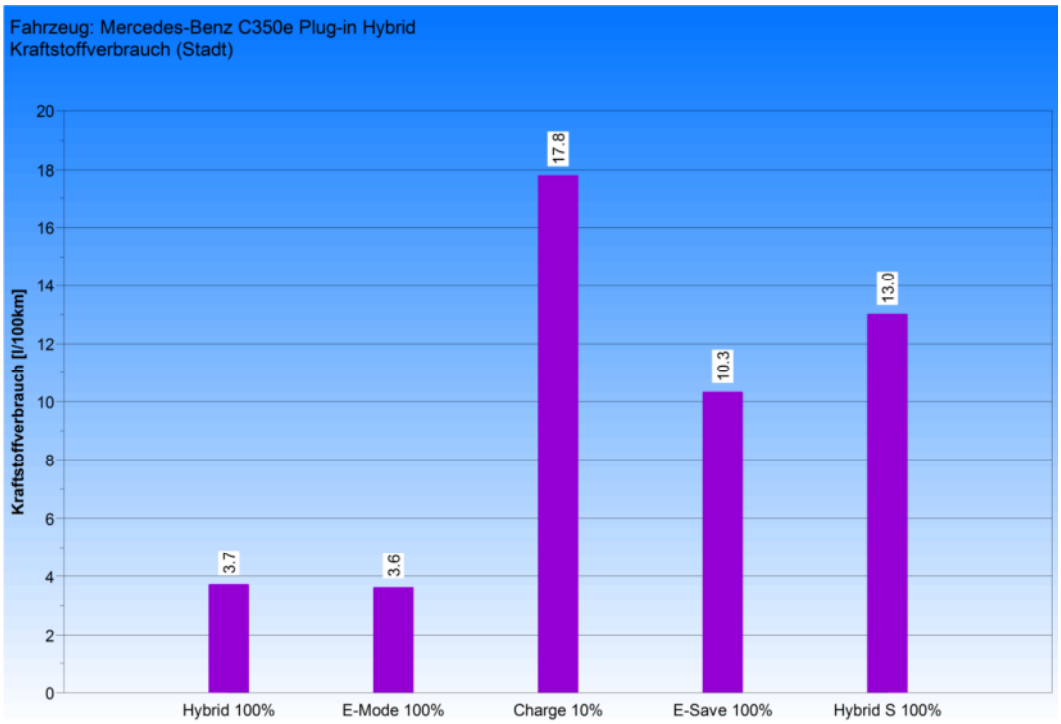

Bild 11: Kraftstoffverbrauch in allen Betriebsmodi auf dem Stadtfahrtabschnitt

Im Stadtverkehr wird sowohl im HYBRID- als auch im E-Modus, im Vergleich zu den übrigen Modi, der mit Abstand niedrigste Kraftstoffverbrauch erzielt (eine vollgeladene Traktionsbatterie zu Beginn der Fahrt vorausgesetzt). Insbesondere der CHARGE-Modus und der HYBRID-Modus, in Verbindung mit Fahrprogramm S, sollten in der Stadt schon aus energetischer Sicht nicht eingesetzt werden. Ein vergleichsweise sehr geringer Wirkungsgrad in diesen beiden Modi im Stadtverkehr ist offensichtlich.

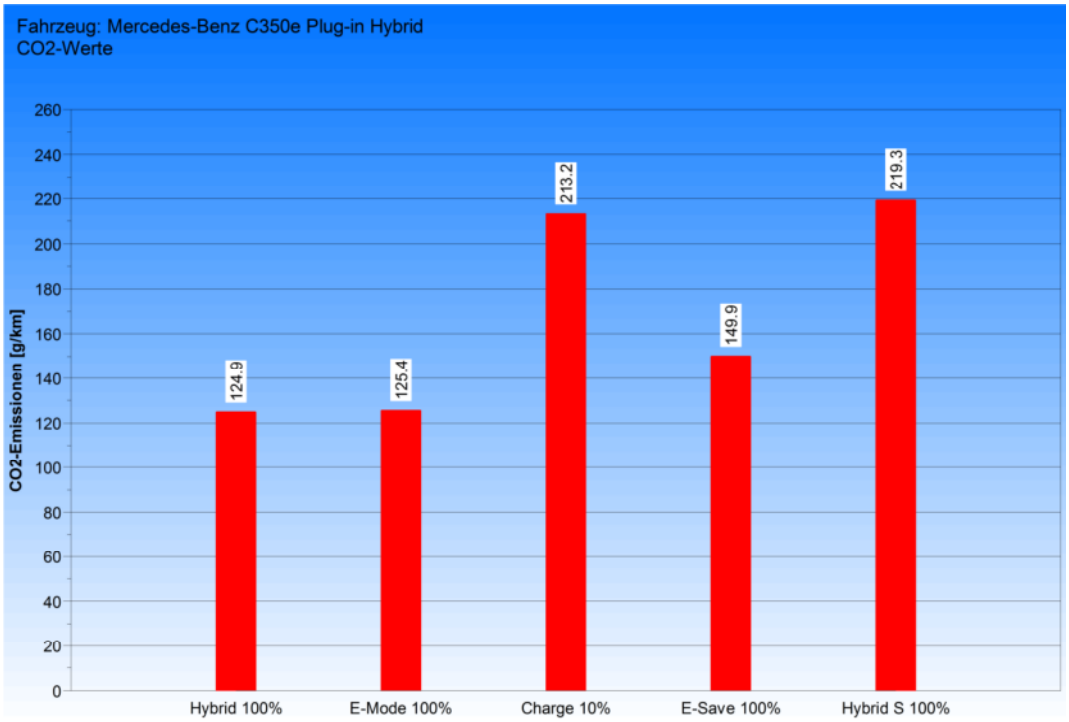

Bild 12: CO_2-Emission

Der geringste CO_2-Ausstoß über die Gesamtfahrstrecke wird in den Modi HYBRID und E erzielt. Die CO_2-Emission bei der Stromerzeugung (Basis: 2016er Kraftwerkmix in Deutschland) ist hierbei bereits enthalten. Im Modus SAVE, der bei SOC_{Start}=100% einem konventionellen Verbrennerantrieb am nächsten kommt, werden ca. 20% mehr CO_2 emittiert. In den Modi CHARGE und HYBRID mit Fahrprogramm S liegt der CO_2-Ausstoß über die Gesamtstrecke ca. 70% höher; der Einsatz dieser beiden Modi sollte daher möglichst gemieden werden.

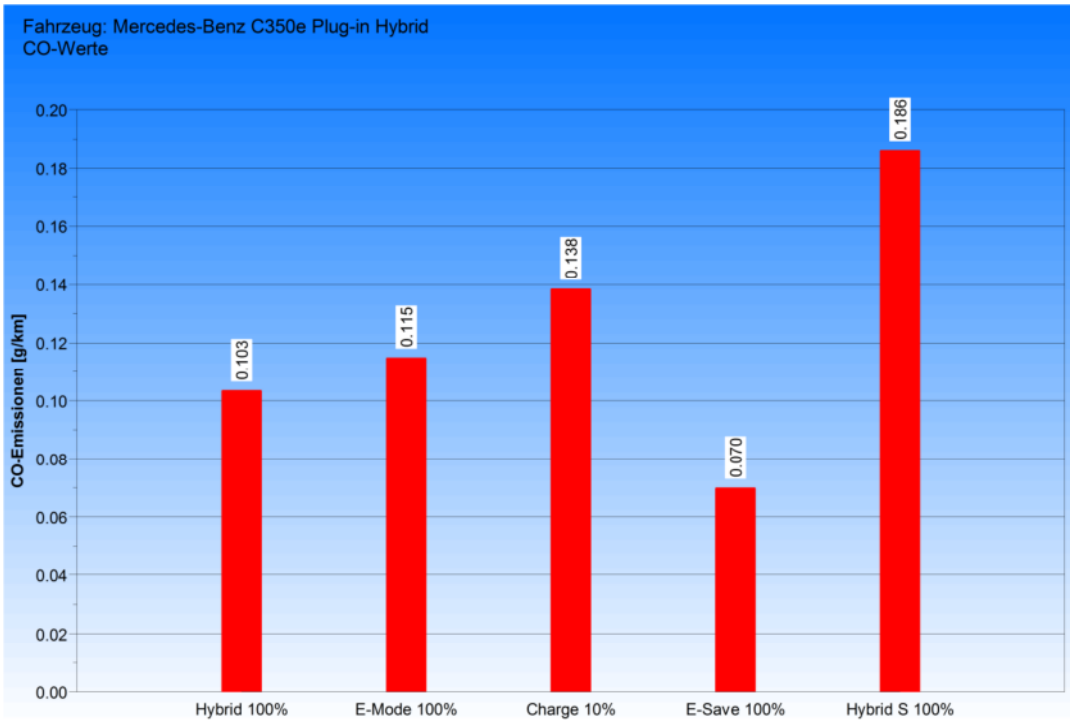

Bild 13: CO-Emission

Der CO-Ausstoß liegt in allen Modi und Fahrprogrammen deutlich unter dem zulässigen Grenzwert (1.000 mg/km).

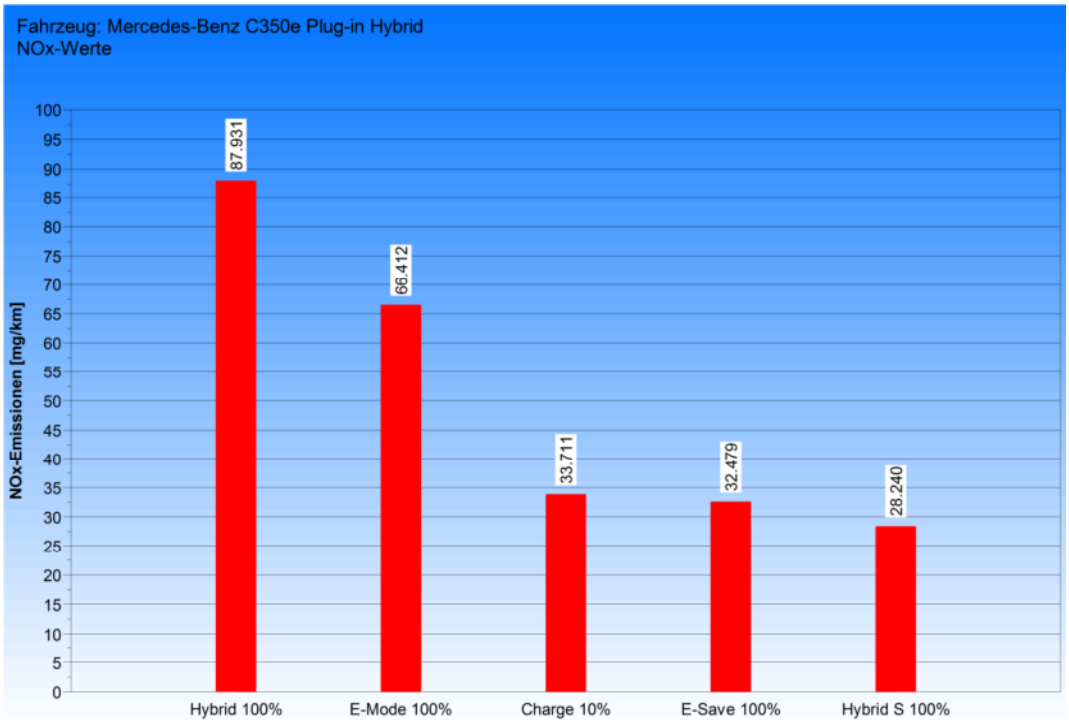

Bild 14: NO_x-Emission

Bei den NO_x-Emissionen liegt der Ausstoß nur in den Modi CHARGE, SAVE und HYBRID (Fahrprogramm S) unter dem zulässigen Grenzwert. Im E-Modus wird der Grenzwert leicht, im HYBRID-Modus gar um ca. 50%, überschritten. Auffällig ist das vergleichsweise gute Abschneiden im HYBRID-Modus (Fahrprogramm S).

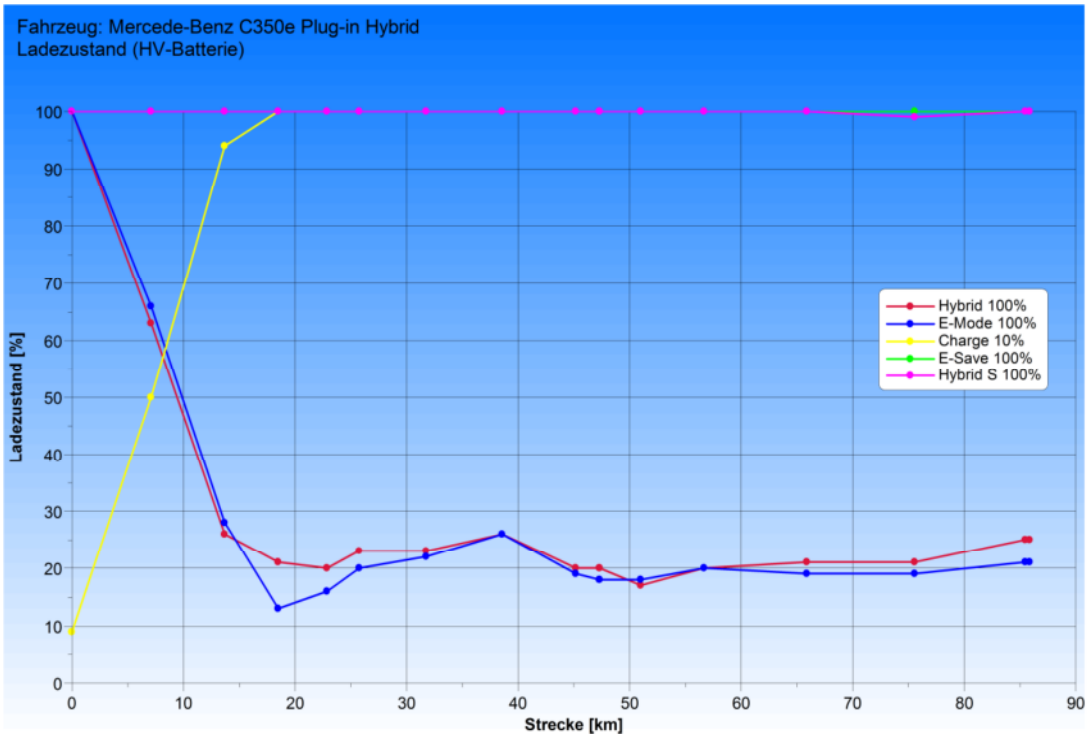

Bild 15: SOC in allen Fahrmodi über die gesamte Fahrstrecke

In den Modi E und HYBRID wird die volle Traktionsbatterie nahezu identisch über die ersten 15 km Fahrstrecke bis auf ca. 15 bzw. 20% entladen und auf der weiteren Fahrt im Bereich um SOC=20% gehalten. Dagegen verharrt der Ladezustand in den Modi SAVE und HYBRID (Fahrprogramm S) über die gesamte Fahrstrecke bei nahezu 100%. Auffällig ist das im Vergleich zu anderen Vollhybridfahrzeugen sehr schnelle Laden im CHARGE-Modus: Der Ladezustand der Traktionsbatterie wird auf weniger als 20 km Fahrstrecke von SOC=10% auf SOC=100% angehoben.

Das Übereinanderlegen des SOC-Diagramms mit den Verbrauchs- und Emissionskurven lässt die folgenden Schlüsse zu:

Der HYBRID-Modus (Fahrprogramm S) liefert die schlechteste Energiebilanz. Hier liegt der Kraftstoffverbrauch gar etwas oberhalb des energetisch schlechten CHARGE-Modus, in welchem über die Gesamtfahrstrecke von ca. 85 km die elektrische Energie für weitere ca. 15 - 20 km generiert wird. In der Gesamteffizienz liegen HYBRID- und E-Modus klar vorne.

Beim Schadstoffausstoß (CO und NO_x) ergibt sich wie bei den zuvor getesteten Vollhybridfahrzeugen ein heterogenes Bild. Das im Vergleich nur mäßige Abschneiden der Modi E und HYBRID ist neben der zeitweise geringen Temperatur im Abgasstrang auch darauf zurückzuführen, dass in der Gesamtbetrachtung der Schadstoffausstoß bei der Stromerzeugung, also quasi die "Kraftstoffherstellung", berücksichtigt wurde (Basis ist der Strommix in Deutschland, Stand 2016: 23,1% Braunkohle, 17,2% Steinkohle, 13,1% Kernenergie, 12,4% Erdgas, 31,7% Erneuerbare Energien, Rest: sonstige Energieträger). Die Kraftstoffherstellung auf fossiler Basis - also der Raffinerieprozess - wird in Vergleichen mit elektrischen Antrieben dagegen bislang noch nicht berücksichtigt.

Stellvertretend für die insgesamt weitaus umfangreichere Datenaufbereitung, im Zuge der durch EKM durchgeführten RDE-Testfahrten, erfolgt abschließend die Darstellung des Betriebszustands im Antriebsystem sowie die Abgastemperatur (Position: Katalysator) für den Fahrabschnitt von 2.000 bis 4.000 sec. im HYBRID-Modus. Das erstmalige Zuschalten des Verbrennungsmotors, erkennbar an dem Anstieg der Katalysatortemperatur, erfolgt nach ca. 2.300 sec. ab Start und damit deutlich früher als bei dem zuvor getesteten BMW 225xe.

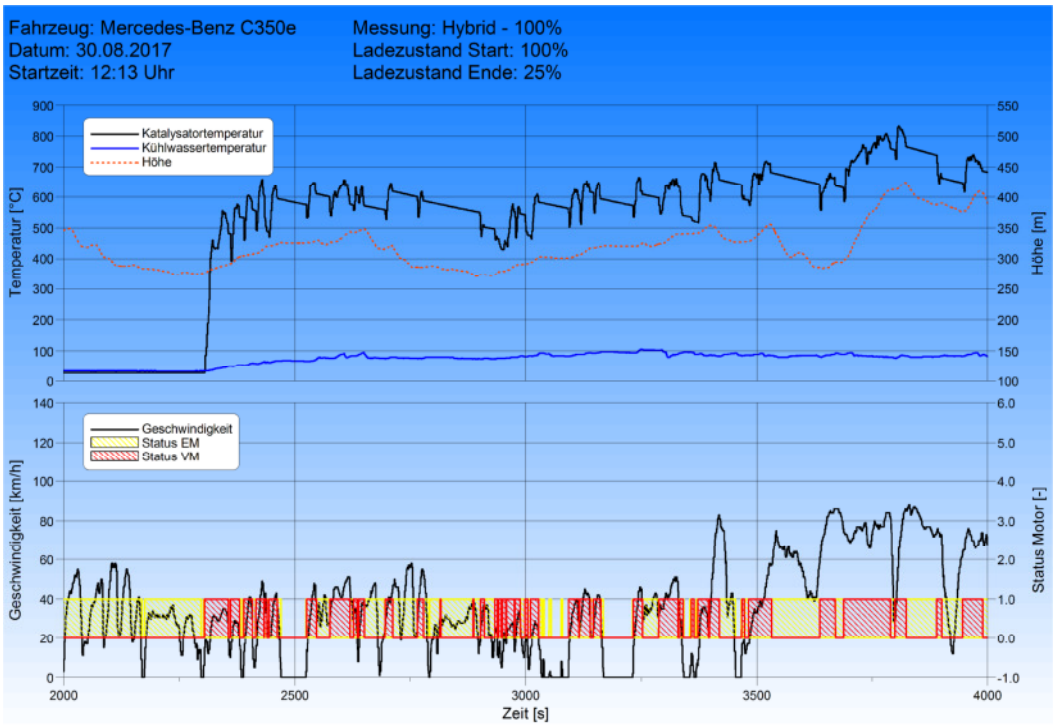

Bild 16: Status des Antriebs sowie Katalysator- und Kühlwassertemperatur im HYBRID-Modus ($SOC_{(Start)}$ 100%) für den Fahrabschnitt von 2.000 bis 4.000 sec (ab Start)

Ausblick

Nach dem Abschluss der RDE-Messfahrten mit dem Mercedes C350e kann die ElringKlinger Motortechnik GmbH inzwischen auf die Erfahrungen und Erkenntnisse aus insgesamt drei aktuellen Vollhybrid-Fahrzeugen zurückblicken. Die jüngsten Messreihen mit der C-Klasse haben wieder neue Erkenntnisse im Hinblick auf Effizienz und Schadstoffausstoß gebracht. Gleichzeitig konnten einige der mit den zuvor untersuchten Fahrzeugen BMW 225xe und VW Passat GTE gewonnenen Erkenntnisse bestätigt werden.

Mercedes bietet dem Fahrer des C350e ausgefeilte Betriebsstrategien in den einzelnen Fahrmodi. Besonders im Hybridmodus in Verbindung mit Zielvorgabe im Navigationssystem wird eine intelligente Nutzung der beiden Antriebe erzielt, was letztlich zu einer vergleichsweise hohen Energieeffizienz führt. In der weiteren Entwicklung von Betriebsstrategien muss auch das Spannungsfeld Verbrauch <-> Schadstoffemissionen zusammenhängend betrachtet werden. Bislang erfolgen ausgerechnet in den vergleichsweise sparsamen Modi E und HYBRID die höchsten NO_x-Emissionen. Ggf. ist der Abgasstrang so zu modifizieren, dass auch nach Phasen rein elektrischen Fahrens schnellstens eine für die Abgasnachbehandlung hinreichende Temperatur gegeben ist.

Die elektrische Reichweite des Mercedes C350e ist mit ca. 20 km vergleichsweise gering. Eine größere Traktionsbatterie für mehr Reichweite sollte im Zuge der aktuell schnellen Entwicklungsfortschritte in der Li-Ionen-Batterietechnik zeitnah realisierbar sein.

Für einen objektiven Vergleich zwischen Verbrennungsmotor-, Hybrid- und rein elektrischen Antrieben müssten in Zukunft auch Energiebedarf und Schadstoffemissionen bei der "Kraftstoffherstellung" durchgängig berücksichtigt werden. Dies ist bei fossilen Energieträgern in den bisherigen Vergleichen noch nicht üblich. Der (teil-)elektrische Antrieb ist heute tatsächlich also schon besser als dargestellt – und wird sich durch den zunehmenden Anteil regenerativer Stromerzeugung in Zukunft auch noch weiter verbessern.

Für die RDE-Messfahrten mit dem Mercedes C350e wurde in dem mobilen Messsystem CuroCon*trol*®Mx ein weiterer spezifischer Fahrzeugdatensatz hinterlegt. Hierzu dient die integrierte Typverwaltung, welche beliebig viele Fahrzeugkonfigurationen abspeichern und verwalten kann. Ansonsten konnte das Messsystem wie für die zuvor getesteten Vollhybridfahrzeuge BMW 225xe und VW Passat GTE sinnvoll ergänzend eingesetzt werden.

Anhang: Vergleichsdiagramme der 3 Vollhybridfahrzeuge

Im Folgenden sind die Messwerte in den einzelnen Fahrmodi für alle drei im RDE-Zyklus getesteten Vollhybridfahrzeuge BMW 225xe, Mercedes C350e und VW Passat Variant GTE dargestellt. In allen drei Fällen wurde die gleiche Fahrstrecke gewählt. Jedoch herrschten bei den Testfahrten unterschiedliche Temperaturen und Witterungsverhältnisse:

VW Passat GTE, Zeitraum 18. - 23.11.2016, ca. 5 - 10°C, teilweise nasse Fahrbahn

BMW 225xe, Zeitraum 01.04. -31.05.2017, ca. 15 - 20°C, trockene Fahrbahn

Mercedes C350e, Zeitraum 22.08. - 08.09.2017, ca. 18 - 20°C, trockene Fahrbahn

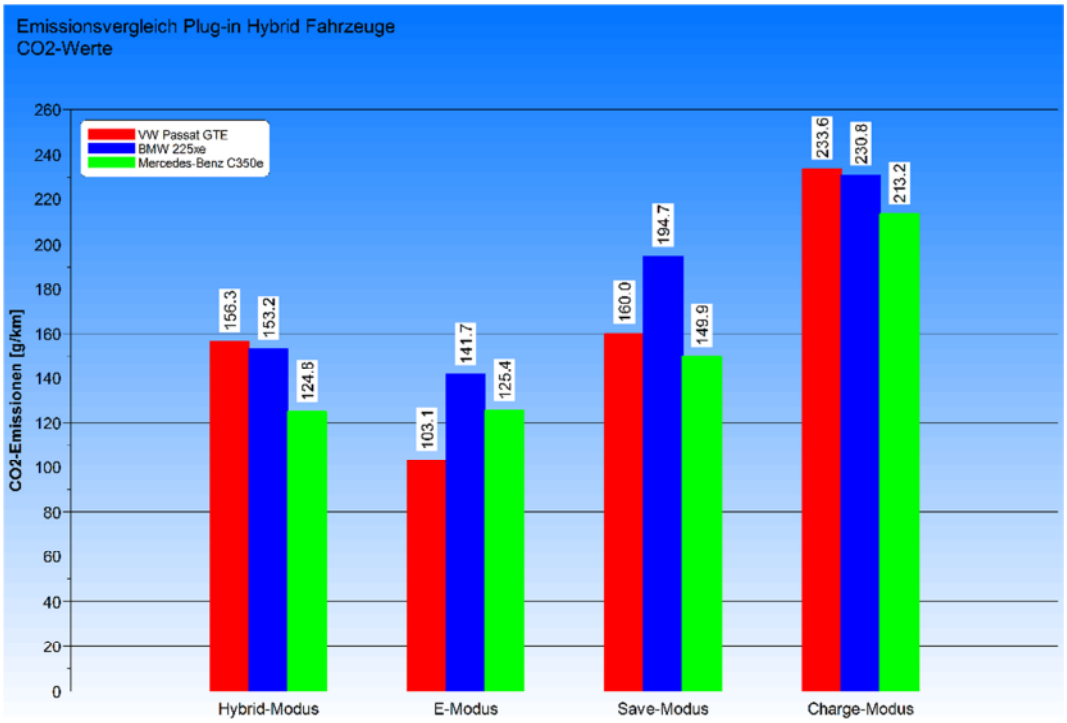

Bild 17: CO_2-Emissionen der drei Vollhybridfahrzeuge im Vergleich

Klar erkennbar ist der geringste Verbrauch aller Fahrzeuge im E- und HYBRID-Modus. Die schlechtesten Werte werden im Charge-Modus erzielt.

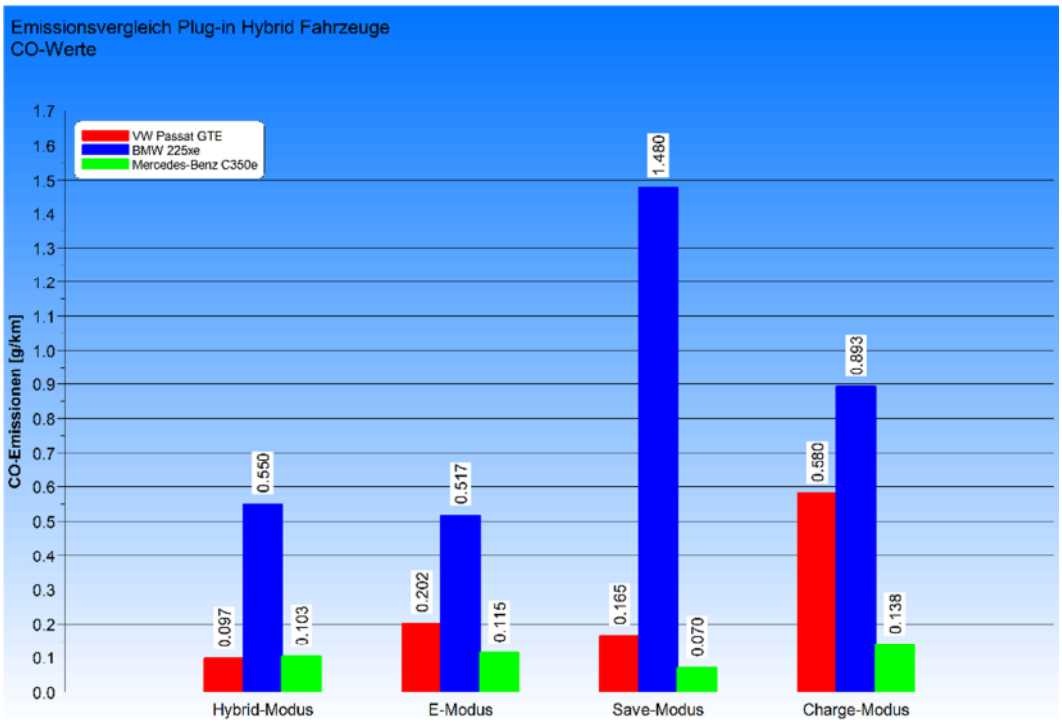

Bild 18: CO-Emissionen der drei Vollhybridfahrzeuge im Vergleich

Hier fällt der BMW 225xe im Vergleich negativ auf. Der Messwert im SAVE-Modus liegt über dem Grenzwert.

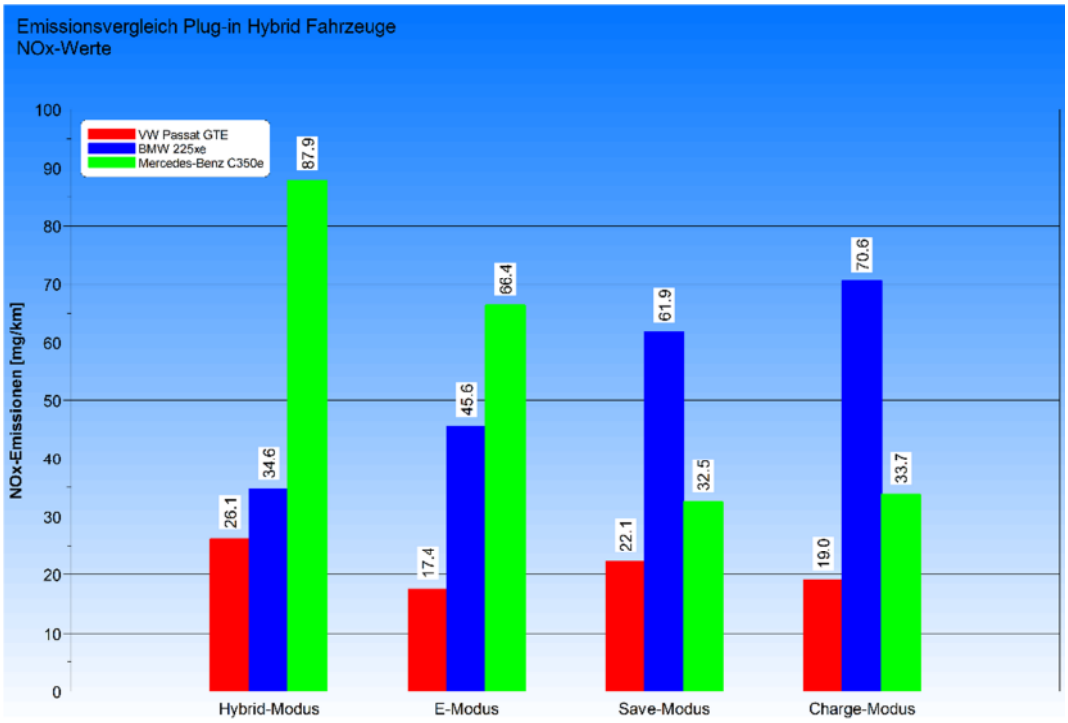

Bild 19: NO_x-Emissionen der drei Vollhybridfahrzeuge im Vergleich

Bei den NO_x-Emissionen liegen die Messwerte des Mercedes C350e (HYBRID- und E-Modus) und des BMW 225xe (SAVE- und CHARGE-Modus) über dem Grenzwert. Der VW Passat GTE verhält sich unauffällig, trotz der zum Testzeitpunkt ungünstigeren Witterungsverhältnisse.

Auch die Vergleichsdiagramme zeigen die Komplexität in der Auslegung von Vollhybridsystemen. Die Vielzahl von Einflussparametern in hardwaretechnischer Ausführung der Antriebskomponenten sowie eine darauf abzustimmende Betriebsstrategie bieten noch ein großes Feld für die weitere Entwicklung.