



Abschlussbericht

Emissions- und Verbrauchsbestimmung von Plug-in-Hybriden (EVH)

28. September 2018

**Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V.**

Institut für Fahrzeugkonzepte



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren

Ehrenberger, Simone; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte

Philipps, Franz; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte

Konrad, Marcel; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte

Förderkennzeichen: 16EM2064-1

Projektleitung: Philipps, Franz

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung des Projekts	1
2	Fahrzyklen und Vorgaben für die Emissionsmessung	3
2.1	NEFZ-Fahrzyklus	3
2.2	WLTC-Fahrzyklus und WLTP-Prozedur	4
2.3	RDE-Test	5
2.4	Auswahl einer geeigneten RDE-Strecke	6
3	PHEV-Fahrzeuge und Marktanalyse zu Projektbeginn	8
3.1	Fahrzeugauswahl	8
3.2	PHEV-Nutzerprofil	12
4	Messmittel	21
4.1	Temperaturmessung	22
4.2	Mobile und stationäre Abgasmessung (PEMS)	22
4.3	Kraftstoffverbrauchsmessung	25
4.4	OBD	26
4.5	Rollenprüfstand	27
4.6	Datenverarbeitung	29
5	Umbau der Fahrzeuge	31
5.1	Ausnahmegenehmigung	31
5.2	Umbau der Fahrzeuge und Einbau Messtechnik	32
5.2.1	Golf GTE	33
5.2.2	BMW 330e	37
5.2.3	Mercedes C350e	40
6	Messprogramm	42
7	Ergebnisse der Emissions- und Verbrauchsmessungen	47
7.1	Ergebnisse der Emissionsmessungen unter verschiedenen Bedingungen	47
7.1.1	Emissionen im realen Betrieb	47
7.1.1	Emissionen im WLTC	55
7.1.2	Vergleich der RDE-Messungen und der Prüfstandsmessungen	61
7.1.3	Emissionen von Kohlenwasserstoffen bei den Prüfstandsmessungen	67
7.2	Verbrauchsmessungen	69
7.2.1	Hauptverbraucher	69
7.2.2	Energie und Kraftstoffverbräuche	70

7.2.3	Nebenverbraucher	83
8	Schlussfolgerungen	85
9	Referenzen	87
Anhang A:	CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen von zwei beispielhaften RDE Tests des VW Golf GTE	88
Anhang B:	CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen von zwei beispielhaften RDE Tests des Mercedes C350e	90

1 Zielsetzung des Projekts

Die Emissionen des Pkw-Verkehrs spielen eine zentrale Rolle für Luftqualität und Klima. Bei der Erfassung der Emissionen und Energieverbräuche haben diverse Messergebnisse der letzten Jahre gezeigt, dass es zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen Messungen im Typprüfzyklus (Labor) und den Emissionen im realen Straßenverkehr (on-road) gibt. Unterschiedliche Fahrzyklen als auch Betriebs- und Außentemperaturen haben unterschiedlichen Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch zur Folge und somit unterschiedliche Schadstoffemissionen wie z.B. CO₂, CO, NO_x, PN, u.a. Im speziellen ist eine ökologische Bewertung von Hybridfahrzeugen schwierig, da hier zusätzlich diverse Fahrmodi (Betriebsstrategie/Betriebszustand des Fahrzeugs) einen signifikanten Einfluss auf die Emissionen haben. Für PHEV-Fahrzeuge (Plug-in-Hybrid-Electric-Vehicle) liegen hierzu derzeit noch keine Kennwerte vor. Zur ökologischen Bewertung solcher Fahrzeuge, insbesondere bei Emissionssimulation von Flotten, ist jedoch eine möglichst realistische Modellierung der Emissionen erforderlich. Dazu ist eine umfängliche Bestimmung der Emissionen dieser Fahrzeuge für die unterschiedlichen Fahrmodi, Temperaturen und Fahrprofile erforderlich.

Ziel dieses Projekts ist es, aktuelle Daten zu Emissionsfaktoren und detaillierten Energieverbräuchen von elektrischen Plug-in-Hybrid Fahrzeugen (PHEV) für Realfahrten und standardisierte Fahrzyklen zu ermitteln. Dies soll durch on-road-Messungen und Vergleichsmessungen am FK-Rollenprüfstand erfolgen. In erster Linie wird hierfür der Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC), der seit September 2017 als Zyklus für die Typprüfzulassung vorgeschrieben ist, als Referenz herangezogen. Zudem wird ein Abgleich mit dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) vorgenommen, der zum Zeitpunkt der Zulassung der im Projekt untersuchten Fahrzeuge als Normzyklus vorgeschrieben war. Im Rahmen der Untersuchung werden auch Messungen der Emissionen und Energieverbräuche bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und für verschiedene Betriebszustände der Fahrzeuge betrachtet. Um mögliche systematische Abweichungen zu analysieren, wurden die Fahrzeuge mit Sensoren und Messtechnik ausgestattet und Messungen am Prüfstand mit on-road-Messungen verglichen.

Repräsentativ für Kompakt-, Mittel- und Oberklasse wurden folgende Fahrzeuge beschafft und ihre Emissionen und Energieverbräuche gemessen:

- VW Golf GTE
- BMW 330e
- Mercedes-Benz C350e

Bezüglich der erfassten Daten wurden die absoluten Emissionen verschiedener Schadstoffe für die untersuchten PKWs in verschiedenen Temperaturbereichen und für verschiedene Fahrzyklen in zeitlicher Auflösung (online-Messungen) untersucht. Schwerpunkt der Analysen ist neben der Bestimmung der Kohlendioxidemissionen (CO₂) die Ermittlung der Emissionen an Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_x) und Partikeln (gemessen als Partikelanzahl PN). Darüber hinaus werden für die am Prüfstand gemessenen Kohlenwasserstoffe und flüchtigen organischen Substanzen (VOC) Ergebnisse für den WLTC vorgestellt. Um die Energieverbräuche der einzelnen Fahrzeuge zu beurteilen, wurden die Daten für elektrischen Verbrauch und Kraftstoffverbrauch separat ausgewertet und der Energiebedarf einzelner Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs analysiert.



Diese Auswertungen ermöglichen eine Zuordnung von Emissionen zu verschiedenen Betriebszuständen der Fahrzeuge. Mit diesen Informationen wurden Emissionsfaktoren in Gramm pro Kilometer (g/km) für die untersuchten Fahrzeugtypen für verschiedene Schadstoffe und für verschiedene Verkehrssituationen (innerorts, außerorts und Autobahn) bestimmt.

2 Fahrzyklen und Vorgaben für die Emissionsmessung

Seit der Umsetzung der ersten Abgasgesetzgebung für Ottomotoren in Kraftfahrzeugen in Kalifornien Mitte der 1960er Jahre wurden die Grenzwerte der unterschiedlichen Emissionen immer weiter reduziert. Nach den USA bzw. Kalifornien haben auch andere Länder und ebenso die EU eigene Prüfverfahren für die Zertifizierung von neuen Kraftfahrzeugen entwickelt. Die Zertifizierung erfolgt in definierten Prüfzyklen, welche im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

Aufgrund der gesetzten Klimaschutzziele führte die EU verbindliche CO₂-Flottenziele für PKWs ein. Jeder Hersteller wird verpflichtet, den Zielwert für die durchschnittliche CO₂-Emission nicht zu überschreiten. Bei Überschreitung des Flottengrenzwerts werden Strafzahlungen, welche von der Höhe der Überschreitungen abhängig sind, fällig. Die Strafzahlung beläuft sich aktuell auf 95€ je Gramm CO₂, um das der Hersteller den Grenzwert überschreitet, mal der Anzahl der verkauften Fahrzeuge [1]. Nach dem aktuellen Stand bedeutet dies für deutsche Autohersteller wie die BMW Group oder Mercedes inklusive Smart dann ab dem Jahr 2030 Strafzahlungen von weit über einer Milliarde Euro – für die VW-Gruppe sogar fast vier Milliarden Euro (Tabelle 1).

Tabelle 1: Strafzahlungen der EU für deutsche OEMs ab dem Jahr 2023 [2]

	CO ₂ Ziele 2023	CO ₂ bei 85% Anteil 48 Volt	Überschreitung ohne BEV	95 € pro g für alle Neuwagen	Zusatz-Wert eines BEV
	g CO ₂ /km			Strafzahlung Euro	Euro
BMW Group	99,6	110,1	10,5	1.090.000.000	11.900
Mercedes-Smart	102,5	115,6	13,1	1.248.000.000	12.400
VW Gruppe	96,7	107,5	10,8	3.980.000.000	11.400

Quelle: CAR Universität Duisburg-Essen

Der Zielwert des Flottengrenzwerts ist herstellerspezifisch und abhängig vom Durchschnittsgewicht der vom Hersteller verkauften Fahrzeugflotte. Dies bedeutet, dass z.B. BMW einen höheren Flottengrenzwert hat als beispielsweise Opel, da BMW durchschnittlich größere und damit auch schwere Kraftfahrzeuge produziert. Als Durchschnittswert über alle verkauften Kraftfahrzeuge ist ein Wert von 130 g CO₂/km festgelegt, der ab 2021 auf 95 g CO₂/km sinkt. Zudem beschloss die EU-Kommission einen Sonderbonus für Fahrzeuge, die weniger als 50 g CO₂/km emittieren. Dies betrifft insbesondere Elektro- und Hybridfahrzeuge [1].

2.1 NEFZ-Fahrzyklus

Die EU-Gesetzgebung verschärft die Emissionsanforderungen stufenweise. Bis zum September 2017 erfolgte die Zertifizierung über den NEFZ (neuer europäischer Fahrzyklus) auf dem Rollenprüfstand. Der NEFZ ist für einen Vergleich verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge untereinander geeignet und ausgelegt, entspricht aber aufgrund seines Geschwindigkeitsprofils unzureichend einem realen Fahrprofil und damit auch nicht der real generierten Emissionen auf der Straße. Außerdem lässt sich mit ihm das Potenzial heutiger rückspeisefähiger Antriebstechnologien nicht umfassend beurteilen. Der Verbrauch und die Emissionen bei der maximalen Geschwindigkeit von 120 km/h werden nur über 10 s

des 20 minütigen Tests gemessen. Geschwindigkeiten über 120 km/h werden nicht berücksichtigt, obwohl hier allein der zu überwindende Luftwiderstand quadratisch ansteigt und somit die Verbrauchswerte und die damit verbundenen Emissionen maßgeblich erhöht werden. Auch die Beschleunigungen im Zyklus sind nicht den typischen realen Verhalten der Nutzer entsprechend. Im NEFZ-Zyklus wird beispielhaft von 0 auf 50 km/h innerhalb von 26 s beschleunigt. Der Zyklus berücksichtigt somit die hohe Dynamik des realen Nutzungsprofils des Kunden nicht. Ebenso sind während der Tests, die zwischen 20°C und 30°C durchgeführt werden, alle Nebenverbraucher ausgeschaltet was im Alltag eher eine Ausnahme darstellt.

2.2 WLTC-Fahrzyklus und WLTP-Prozedur

Aufgrund der Schwachstellen des NEFZ wird mit der Euro 6d Abgasgesetzgebung in Europa die Zertifizierung zur Erlangung der Typengenehmigung erneuert. Der WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) basiert auf real aufgenommenen Fahrdaten und soll dem Verbraucher sowie dem Gesetzgeber im Vergleich zum NEFZ realitätsnähere Angaben liefern. Der WLTC ist in die Abschnitte Low, Medium, High und Extra High unterteilt. Für die Fahrzeugcharakterisierung erfolgt keine Vorkonditionierung auf Betriebstemperatur. Der Test wird mit einem Kaltstart begonnen.

Der Vergleich zwischen WLTC und NEFZ (siehe Tabelle 2) zeigt deutlich die Unterschiede und die realitätsnähere Abbildung eines typischen Fahrprofils bezüglich der aktuellen Fahrzeugnutzung für PKWs im WLTC. Der WLTC zeichnet sich sowohl durch eine höhere Maximalgeschwindigkeit als auch durch dynamischere Beschleunigungen aus. Ebenso wurde der Standzeitanteil auf einen realitätsnahen Anteil, im Vergleich zum NEFZ, reduziert und die Gesamtzykluszeit von 20 auf 30 Minuten verlängert.

Somit bildet der WLTC-Zyklus als Fahrprofil weit näher das reale Fahrverhalten der meisten Nutzer als der NEFZ-Fahrzyklus ab.

Neben dem WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test *Procedure*) Standardprozess der Typprüfzulassung, bei dem die Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand den Standardzyklus WLTC (Worldwide harmonized Light Duty Test *Cycle*) durchfahren, sind zudem RDE-Fahrten (Real Driving Emissions) im realen Fahrbetrieb auf einer festgelegten Strecke verpflichtend. Ab September 2017 müssen neue Modelle von Kraftfahrzeugen ergänzend zum WLTC auch die Emissionsprüfung unter realen Fahrbedingungen (RDE) bestehen.

Tabelle 2: Vergleich der Fahrzyklen WLTC und NEFZ

	WLTC	NEFZ
Starttemperatur	Kalt	Kalt
Zykluszeit	30 min	20 min
Zyklustemperatur	23°C	20-30°C
Standzeitanteil	13 %	25 %
Zykluslänge	23,25 km	10,8 km
Geschwindigkeit	Mittel: 46,5 km/h maximal: 131 km/h	Mittel: 34 km/h maximal: 120 km/h
Antriebsleistung	Mittel: 7,5 kW maximal: 47 kW	Mittel: 4 kW maximal: 34 kW
Schaltung	Fahrzeugspezifisch	Fixe Schaltpunkte
Einfluss Sonderausstattung und Klimatisierung	Berücksichtigt werden: <ul style="list-style-type: none"> • Sonderausstattungen über Gewicht, Aerodynamik und Bordnetzbedarf (Ruhestrom). • rotatorische Anteile • Fracht und Passagiere • Reifenwahl und Druck • Kraftstoffqualität Wird nicht berücksichtigt.	
	Nicht berücksichtigt sind: <ul style="list-style-type: none"> • Klimaanlage 	
RDE (Real Driving Emissions)	Ja	Nein
Fahrzeugklasseneinteilung	3 Gewichts-/Leistungsklassen: <ul style="list-style-type: none"> • bis 22 Watt pro kg, • bis 34 Watt pro kg • ab 35 Watt pro kg 	Keine/- Schwungmassenklassen

2.3 RDE-Test

RDE-Fahrten umfassen drei verschiedene Bereiche, die auf der Geschwindigkeit des Fahrzeugs basieren. Führt das Fahrzeug langsamer als 60 km/h, befindet es sich im Urban-Bereich. Bewegt sich das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit zwischen 60 km/h und 90 km/h, so befindet es sich im Rural-Bereich und oberhalb von 90 km/h im Highway-Bereich [3]. Die Durchführung einer RDE-Messung unterliegt verschiedenen Randbedingungen, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind. Dabei sind die Parameter Temperatur und Höhe in zwei Bereiche, moderat und erweitert, unterteilt. Durch die Konformitätsfaktoren wird für

eine Übergangszeit ein gewisser Spielraum in der Umstellung auf die neue Messmethode gewährt. So darf laut Bestimmung der Stickoxid-Ausstoß neuer Kraftfahrzeuge mit Ottomotor unter realen Fahrbedingungen maximal 60 mg/km betragen. Für die Übergangszeit gilt ab September 2017 der Konformitätsfaktor 2,1, d.h. der Stickoxid-Ausstoß darf im Realbetrieb maximal das 2,1-fache der gesetzlich vorgeschriebenen 60 mg/km überschreiten werden. Das entspricht einer Überschreitung der Vorgabe um 110%. Ab dem Jahr 2020 beträgt der Konformitätsfaktor 1,5, d.h. dann gilt eine Überschreitung des Grenzwertes um max. 50%. Desweiteren ist bei der Messung zu beachten: Fällt ein Messpunkt in die erweiterten Bedingungen (Tabelle 3) so müssen die gemessenen Emissionen mit dem Faktor 1,6 multipliziert werden. Liegt ein Datenpunkt außerhalb der Randbedingungen, so ist die gesamte Messung ungültig.

Tabelle 3: Wesentliche Randbedingungen für RDE-Messungen [3]

Parameter	Bedingungen
Nutzlast	≤ 90% des maximalen Fahrzeuggewichts
Höhe	moderat: 0 m bis 700 m ü.NN erweitert: 700 m bis 1300 m ü.NN
Höhendifferenz absolut	maximal 100 m Höhenunterschied zwischen Start- und Endpunkt
Kumulierte Höhendifferenz	1200 m/100km
Umgebungstemperatur	moderat: 0°C bis 30°C erweitert: -7°C bis 0°C und 30°C bis 35°C
Standzeitanteil	zwischen 6% und 30% des städtischen Anteils
maximale Geschwindigkeit	145 km/h (160 km/h) für max. 3% des Autobahnanteils

Auf Grund der sich laufend ändernden Randbedingungen im realen Straßenverkehr und der aufwendigen, komplexen Messtechnik ist eine exakte Reproduzierbarkeit von RDE-Fahrten auch auf gleicher RDE-Strecke mit gleichem Fahrzeug und bei gleichen Witterungsverhältnissen nicht gegeben. Da der Aufwand für eine RDE-Messfahrt sehr hoch ist – hier ist mit einem Tag pro Messung und zwei Personen zu rechnen – werden mehrere RDE-Fahrten zur statistischen Mittelwertgenerierung der Messwerte nicht durchgeführt, sondern Einzelfahrten zur repräsentativen Bewertung herausgegriffen.

2.4 Auswahl einer geeigneten RDE-Strecke

Um normkonforme RDE Fahrten durchzuführen, wurde eine Strecke ermittelt, welche die in der Norm beschriebenen Anforderungen erfüllt. Dies beinhaltet sowohl die prozentuale Aufteilung von ca. jeweils 33% in die Bereiche Stadt (0,1-60 km/h), Überland (60-90 km/h) und Autobahn (ab 90 km/h) sowie auch die Gesamttestzeit (90-120 min.), Halte- und Stoppzeiten, kumulierte Steigungen, Beschleunigungen und Geschwindigkeitsanforderungen [3].

Da aufgrund des geforderten Kaltstarts des Fahrzeuges nur eine Testdurchführung pro Tag umsetzbar ist, wurde die Strecke so ausgewählt und bestimmt, dass diese die in der Norm beschriebenen Anforderungen so gut erfüllt, dass auch bei diversen Verkehrsbehin-

derungen, Streckensperrungen und wechselnden Verkehrsbedingungen die Messung im gültigen Bereich der Anforderungen bleibt.

Es wurden verschiedene Strecken im Umkreis von Stuttgart untersucht und diese hinsichtlich des Erfüllungsgrades der Norm analysiert. Durch die stark wechselnden Verkehrsbedingungen, den vielen Steigungen im Umland und der Umstand, dass höchstens ein Test pro Tag durchgeführt werden kann, nahm dieser Teil der Arbeiten zur Definition einer gültigen und fehlertoleranten RDE-Strecke sehr viel Zeit in Anspruch. Als RDE-Strecke wurde der in der Abbildung 1 dargestellte Rundkurs von Stuttgart über Sindelfingen nach Herrenberg und zurück über Weil der Stadt gewählt. Im unteren Bereich des Bildes ist das dazugehörige Höhenprofil der Strecke dargestellt. Dieses erfüllt die Normvorgaben, dass die kumulierten positiven Steigungen 1200 m/100 km nicht überschreiten.

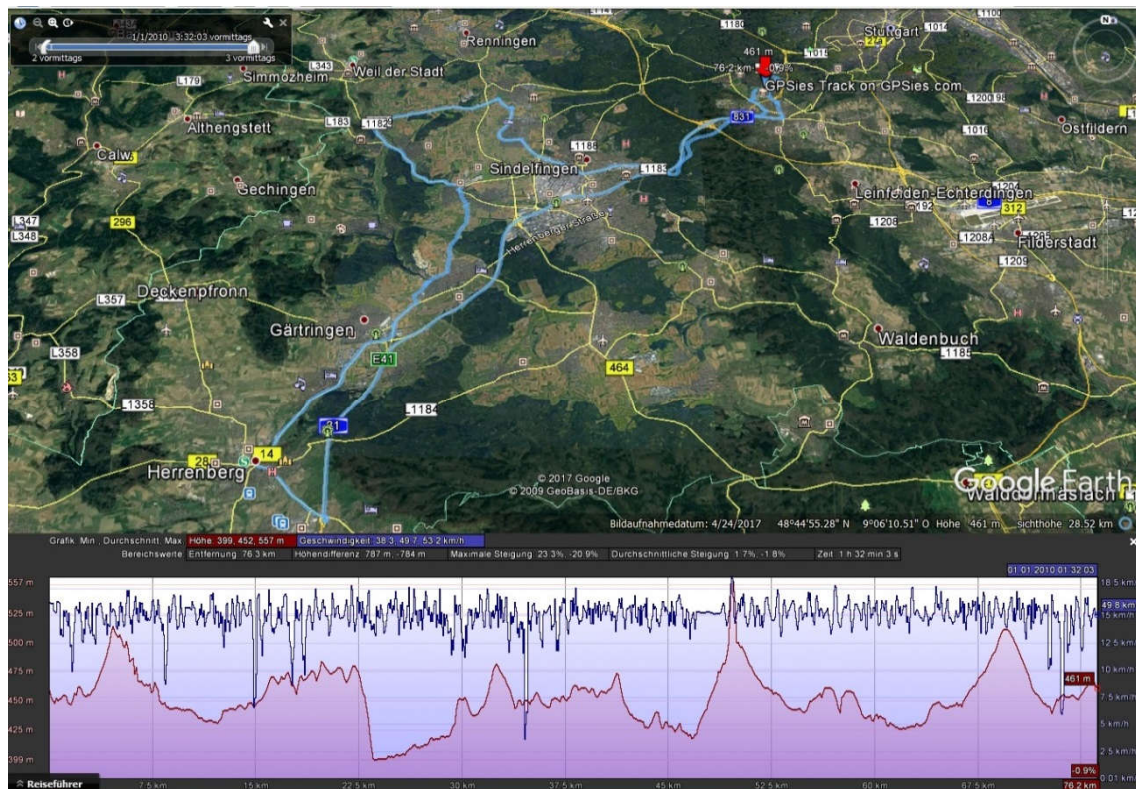


Abbildung 1: Teststreckenanalyse für die RDE-Messung und die Nachbildung im Prüfstand
Bildquelle: Google Earth

3 PHEV-Fahrzeuge und Marktanalyse zu Projektbeginn

3.1 Fahrzeugauswahl

Für die Auswahl der im Projekt zu untersuchenden Fahrzeuge ist eine Reihe verschiedener Kriterien berücksichtigt worden. Neben den Randbedingungen Verfügbarkeit, Lieferzeit, Hybridvariante sowie Ausstattungsfähigkeit mit einer Anhängerkupplung für die mobile Messeinrichtung waren dies: die Repräsentation der verschiedenen Fahrzeugklassen „Kompakt“, „Mittelklasse“ und Oberklasse“, die Vertretung unterschiedlicher Hersteller und - um repräsentative Kennzahlen zu gewährleisten - die Verbreitungshäufigkeit. Die gewählten Randbedingungen gewährleisten somit ein breites Spektrum an auswertbaren Ergebnissen sowie ein breites Spektrum an repräsentativen Emissionskennzahlen.

Die Auswahlkriterien werden im Folgenden kurz erläutert.

In Deutschland wurden zwischen Januar 2014 und Juli 2016 insgesamt 47.504 E-Fahrzeuge neu zugelassen. Davon waren 29.767 rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und 17.737 Plug-in Hybride (PHEV). Damit beläuft sich in diesem Zeitraum der Anteil an PHEV-Fahrzeugen an den insgesamt zugelassenen E-Fahrzeugen auf 37,3% Prozent.¹

Zu den zum Zeitpunkt des Projektbeginns in Deutschland am häufigsten zugelassenen Plug-In-Fahrzeugtypen gehören mit der im Folgenden aufgeführten Platzierung [4]:

- 1 Mitsubishi Outlander
- 2 Audi A3 e-tron (Technologie entsprechend Golf GTE)
- 3 Golf GTE (Technologie identisch mit Audi A3 e-tron)
- 4 Passat GTE
- 5 Mercedes C350e²
- 6 BMW 225 xe³

Zum Startzeitpunkt des Projekts waren folgende Hybrid-Fahrzeuge von deutschen OEMs frei auf dem Markt verfügbar (Aufstellung alphabetisch):

- Audi A3 e-tron
- Audi Q7 e-tron
- BMW 740e iPerformance
- BMW 330e
- BMW i3 Rex
- BMW i8
- BMW X5 xDrive40e

¹ Im Projekt InitiativE-BW wurden bis zum Projektende (31.12.2016) insgesamt 479 E-Fahrzeuge eingeführt. Im Vergleich zur bundesweiten Verteilung von PHEV Fahrzeugen an den gesamtzugelassenen EV-Fahrzeugen waren im Projekt InitiativE-BW von den 476 Fahrzeugen nur 37 Fahrzeuge mit einem Plug-in Hybrid Antrieb ausgerüstet. Dies entspricht einem Anteil von 7,8%. Von den Plug-in-Hybridfahrzeugen werden 24 gewerblich eingesetzt. Des Weiteren waren von den im Projekt InitiativE-BW eingeführten Fahrzeugen 10 Fahrzeuge mit einem Range Extender ausgestattet.

² Der Mercedes C350e ist - seit Februar 2015 neu auf dem Markt

³ Der BMW 330e wurde erst ab März 2016 auf dem Markt verfügbar

- Mercedes C350e
- Mercedes GLE 500 e 4matic
- Mercedes S 500 Plug-in-Hybrid
- Porsche Cayenne S Hybrid
- Porsche Panamera S E-Hybrid
- VW Golf GTE
- VW Passat GTE

Aus dieser Liste der verfügbaren Hybridfahrzeuge wurden unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Auswahlkriterien repräsentative Fahrzeuge zur Bewertung herangezogen und jeweils ein Repräsentant für die verschiedene Klassen gewählt. Gelände- und Sportfahrzeuge wurden aufgrund der geringeren Verkaufszahlen nicht in die engere Wahl genommen. Die Bewertungskriterien wie Beschaffungszeit, Kosten oder Reichweite für die in die engere Auswahl genommenen Fahrzeuge sind in der Entscheidungsmatrix (Tabelle 4) dargestellt.

Tabelle 4: Fahrzeugbewertungsmatrix ausgewählter Fahrzeuge

	Golf GTE	Passat (variant) GTE	BMW 330e	BMW i3 Rex	Mercedes C350 e Limousine	Audi A3 e-tron
Preis (ca. Basis ohne Ausstattung)	37.000€	46.500€	43.000€	42.000€	52.000€	37.000€
Klasse	Kompaktklasse	Mittelklasse	Mittelklasse	Kleinwagen	Ober-/Mittelklasse	Kompaktklasse
Verkaufsstart	08/2014	08/2014	03/2016	11/2013	03/2015	Sommer/2014
Verkaufszahlen [4]	2.109 (2015)	996 (2015)	Verfügbar in Deutschland ab März 2016	210 Rex im Dezember 2015	501 (2015)	1.839 (2015)
Anhängerkuppelung für PEMS	Ja	Ja	ggf. nachrüstbar	Nein	ja	ja
Lieferzeit	ca. 7 Wochen	ca. 11 Wochen	ca. 12 Wochen	ca. 6 Monate	September/Oktober 2016	12 Wochen
Reichweite elektrisch [km]	50	50	40	160	31	50
Batteriegröße [kWh]	8,7	9,9	7,6	18,8	6,38	8,8
OBD						
Hybridvariante	Plug-in-hybrid	Plug-in-hybrid	Plug-in-hybrid	Elektrofahrzeug mit Rangeextender	Plug-in-hybrid	Plug-in-hybrid
Bewertung	+++	++	+++	+	+++	++

Basierend auf der Bewertungsmatrix wurde, unter Berücksichtigung der oben dargestellten Auswahlkriterien, die folgende Fahrzeugauswahl getroffen:

- Golf GTE
 - BMW 330e
 - Mercedes C350e
- repräsentiert den Bereich der Kompaktklasse
 - repräsentiert den Bereich der sportlichen Mittelklasse-Fahrzeuge
 - repräsentiert als 4-türige Limousine die obere Mittelklasse



Abbildung 2: Ausgewählte Fahrzeuge

Der VW-Golf GTE mit der geringsten Leistung, aber der größten Batteriekapazität und daher auch größten elektrischen Reichweite bildet gut die Kompaktklasse, der Mercedes C350e mit der größten Leistung und der geringsten Kapazität die obere Mittelklasse ab.

Die technischen Daten der Fahrzeuge sind in Tabelle 5 aufgelistet. Der Tabelle können die Leistungswerte für die Verbrenner- und Elektromotoren, die Emissionen, die Batteriekapazität, die elektrischen Reichweiten und Verbräuche als Herstellerangaben entnommen werden. Alle Fahrzeuge sind als Euro 6 –Fahrzeuge klassifiziert und zugelassen.

Tabelle 5: Übersicht über die technischen Eigenschaften der Versuchsfahrzeuge

	VW Golf GTE	BMW 330e	Mercedes C350e
Typ:	Kompaktklasse	Mittelklasse	Obere Mittelklasse
Karosserie:	Kombilimousine	Limousine	4-türige Limousine
Motoren:	Elektromotor: 102 PS Verbrenner 1.4L: 150 PS	Elektromotor: 88 PS Verbrenner 2.0L: 184 PS	Elektromotor: 109 PS Verbrenner 2.0L: 211 PS
Hubraum:	1395 ccm ³	1998 ccm ³	1998 ccm ³
Systemleistung:	204 PS	252 PS	279 PS
Max. Drehmoment:	350 Nm	420 Nm	600 Nm
Antrieb:	Frontantrieb	Heckantrieb	Heckantrieb
Leergewicht:	1599 kg	1735 kg	1780 kg
CO₂-Emissionen kombiniert:	35 g/km	44 g/km	48 g/km
Höchstgeschwindigkeit:	217 km/h	225 km/h	250 km/h
Abgasnorm:	Euro 6	Euro 6	Euro 6
Angegebener Kraftstoffverbrauch NEFZ:	1,5 l/100km	1,9 l/100km	2,1 l/100km
Angegebener Energieverbrauch NEFZ:	11,4 kWh/100km	11 kWh/100km	11 kWh/100km
Erstzulassung des Projektfahrzeugs:	15.12.2016	15.12.2016	14.03.2017
Batteriekapazität:	8,7 kWh	7,6 kWh	6,4 kWh
Angegebene elektrische Reichweite im NEFZ:	50 km	40 km	31 km

3.2 PHEV-Nutzerprofil

Um vor Beginn der Messkampagne eine Einschätzung zu Fahrzeugnutzung, Fahrprofilen und vor allem zum Ladeverhalten (elektrischer Fahranteil) von PHEVs zu bekommen, ist im Unterauftrag durch die e-Motion Line GmbH im Zeitraum September bis November 2016 eine telefonische Umfrage unter den 30 PHEV-Nutzern, die ihr Fahrzeug im Rahmen des Vorläuferprojektes InitiativeE-BW-Projekts beschafft hatten, durchgeführt worden. Von den 30 PHEV-Nutzern unterschiedlicher Fahrzeuge haben sich 12 Nutzer bereit erklärt und Auskunft erteilt.

Die Befragten sind in verschiedenen Geschäftsfeldern tätig. Die Aufteilung der Geschäftsfelder ist in (Tabelle 6) dargestellt.

Tabelle 6: Tätigkeitsfelder der befragten PHEV-Nutzer

Tätigkeitsfeld	Anzahl
Handel und Gewerbe	2
Handwerk	2
Industrie	2
Consulting	1
Energiewirtschaft	1
Kommune	1
Privat	1
Sonstige	2

Bis auf ein Fahrzeug sind die Fahrzeuge alle gewerblich zugelassen, darunter werden 7 Dienstwagen-PHEV auch privat genutzt (Tabelle 7). Innerhalb der Befragten gibt es einen gewerblichen Flottenutzer mit 5 PHEV, während der Rest der Teilnehmer nur jeweils einen PHEV nutzt. Die Nutzung als reines Poolfahrzeug kommt nur bei dem kommunalen Teilnehmer vor. Die Nutzung als Service-Fahrzeug kommt bei 3 der befragten Teilnehmer vor, hiervon geben allerdings zwei Teilnehmer an, das Fahrzeug auch auf dem Weg zur Arbeitsstätte zu nutzen.

Tabelle 7: Nutzungsform der PHEV

In welcher Form nutzen Sie das PHEV?	Anzahl
Ich nutze das PHEV als Dienstwagen (d.h. das PHEV ist auf Ihren Arbeitgeber zugelassen und wird von Ihnen, evtl. auch Ihren Haushaltsmitgliedern, zu dienstlichen und privaten Zwecken genutzt).	7
Ich nutze das PHEV ausschließlich für dienstliche Zwecke als ein sog. Service-Fahrzeug (d.h. das PHEV ist auf Ihren Arbeitgeber zugelassen und wird ausschließlich zu dienstlichen Zwecken genutzt; andere Kollegen nutzen das PHEV nicht regelmäßig).	3
Ich nutze das PHEV ausschließlich für dienstliche Zwecke als ein Poolfahrzeug (d.h. das PHEV ist auf Ihren Arbeitgeber zugelassen und wird auch von Ihren Kollegen regelmäßig genutzt).	1
Ich nutze das PHEV als Privatfahrzeug (d.h. das PHEV ist auf Sie oder ein Mitglied Ihres Haushalts oder Ihrer Familie zugelassen).	1

Die Benzin-PHEV-Fahrzeugmodelle umfassen Audi A3 (6 Stück, davon 5 in einer Flotte), BMW i8 (4 Stück) und Mitsubishi Outlander Plugin (6 Stück).

Geladen wird überwiegend daheim, zum Teil auch als Mischung von daheim und auf dem Betriebsgelände (Tabelle 8). Zum Großteil wird direkt nach der Nutzung geladen (Tabelle 9). Alle, die ausschließlich daheim laden, geben an, direkt nach Nutzung zu laden, potentiell also abends/über Nacht. Ein Nutzer, dem auch einen Ladepunkt in der Firma zur Verfügung stand, lädt sein Fahrzeug trotzdem ausschließlich abends daheim wieder auf. Geplantes Laden ist für keinen der Teilnehmer ein Thema.

Tabelle 8: Ladeorte

Wo laden Sie das PHEV täglich?	Anzahl	Schuko-Steckdose	Ladestation
Nicht-öffentlich: zu Hause	8	4	
Nicht-öffentlich: auf dem Betriebsgelände	3		2
Nicht-öffentlich: zu Hause und auf dem Betriebsgelände	1	1	
Nicht-öffentlich und öffentlich: zu Hause und an öffentlichen Ladestationen ⁴	1	-	1

Tabelle 9: Ladezeiten

Wie laden Sie das PHEV?	Anzahl
Direkt nach der Nutzung	9
Abends zu Hause	1
Immer wenn eine Lademöglichkeit besteht	1
Morgens nach der Fahrt	1

Mittels einer Analyse der im Rahmen von InitiativeE-BW durchgeführten Umfragen konnten drei Nutzer identifiziert werden, die auf dem Betriebsgelände Ihrer Firma eine Photovoltaik-Anlage installiert haben und diese auch zur Ladung ihres PHEV einsetzen.

Die Fahrzeuge werden vom überwiegenden Teil der Befragten maximal 2 Stunden am Tag genutzt (Abbildung 3) und bietet damit potentiell Möglichkeiten für gesteuertes Laden/mobile Speicherfunktionen (Stichwort Sektorkopplung Energie und Verkehr).

⁴ Förderprojekt „emma“ [5]

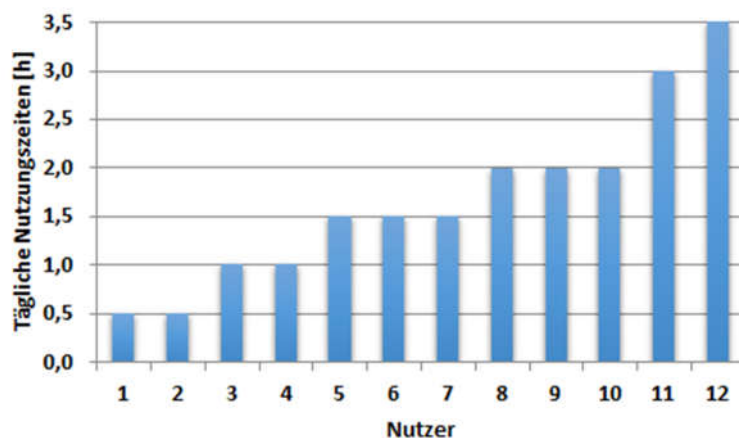


Abbildung 3: Tägliche Nutzungsdauer der PHE-Fahrzeuge in Stunden (Nutzer-Angabe)

Knapp 60% der Befragten geben an, durch lange Strecken und fehlende/nicht zugängliche Ladeinfrastruktur von einer Ladung abgehalten worden zu sein (Tabelle 10). Offensichtlich stellt das „Auswärtsladen“ momentan noch eine deutliche Hürde dar, sei es durch den zusätzlichen Zeitaufwand, sei es durch andere Zugangsbedingungen zu den Ladesäulen oder unterschiedliche Ladestandards (CHAdeMO, CCS), sei es durch die Tatsache, dass das Fahrzeug immer auf die Rückfalllösung der Nutzung des Verbrennungsmotors zurückgreifen kann.

Tabelle 10: Ladehindernisse

Welche externen Einflüsse können Sie von einer Ladung abhalten?	Anzahl
Keine Einschränkung	5
Lange Strecken	3
Keine Lademöglichkeit	3
Zugänglichkeit Ladeinfrastruktur	1

Da die meisten Fahrzeuge dienstlich genutzt werden, übernimmt bei 9 Nutzern der Arbeitgeber die Energiekosten (Tabelle 11). D.h. auch, dass die Kosten kein Ladehindernis darstellen.

Tabelle 11: Kostenträger Energiekosten

Wer bezahlt die Energiekosten?	Anzahl
Ich selbst	3 ⁵
Arbeitgeber	6

⁵ Ein privater Nutzer, zwei Dienstwagen-Nutzer

Arbeitgeber, sofern am Arbeitsplatz geladen wird	3
--	---

Die meisten Befragten geben an, Ihr Hybridfahrzeug in allen Nutzungsumfeldern einzusetzen (Tabelle 12). Fünf Nutzer bewegen sich sogar fast ausschließlich in nur einem Umfeld (ländliches Gebiet oder Innenstadt oder Autobahn/Bundesstraße).

Tabelle 12: Nutzungsumfeld (mehrere Nennungen möglich)

In welchem Umfeld fahren Sie mit diesem PHEV hauptsächlich?	Anzahl
Innenstadt/Kernstadt	7
Ballungsraum	2
Überwiegend ländliches Gebiet	5
Autobahn/Bundesstraße	6

Passend zur dienstlichen Nutzungsform werden die Fahrzeuge an Werktagen täglich genutzt, an Wochenenden in 2/3 der Fälle nur vereinzelt oder nie (Tabelle 13).

Tabelle 13: Nutzungshäufigkeit

Wie häufig nutzen Sie das PHEV?	Anzahl Werktag	Anzahl Wochen- ende
Täglich	12	4
Vereinzelt		4
Nie		4

Die zurückgelegten Strecken (einfache Fahrt) haben nach Angaben der Befragten häufig eine Länge von bis zu maximal 50 km (Abbildung 4).

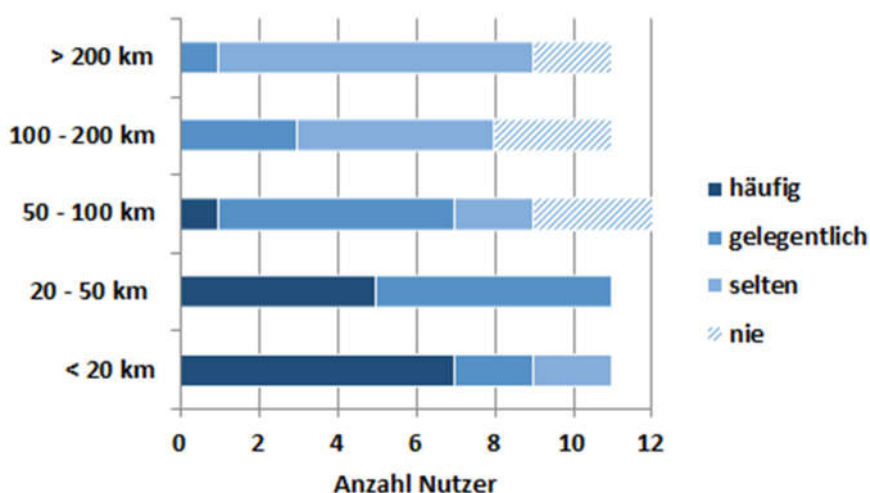


Abbildung 4: Streckenlängen und Häufigkeit (Nutzer-Schätzung)

Dazu passend gibt die Mehrheit der Befragten an, ihre tägliche Strecke überwiegend im elektrischen Fahrmodus zurückzulegen (Abbildung 5). 5 Nutzer geben an, fast ausschließlich (90-100%) elektrisch zu fahren, weitere 5 Nutzer fahren nach eigener Einschätzung mindestens $\frac{3}{4}$ ihrer täglichen Strecke im elektrischen Fahrmodus. Nur 2 Nutzer geben an, hauptsächlich mit dem Verbrennungsmotor zu fahren.

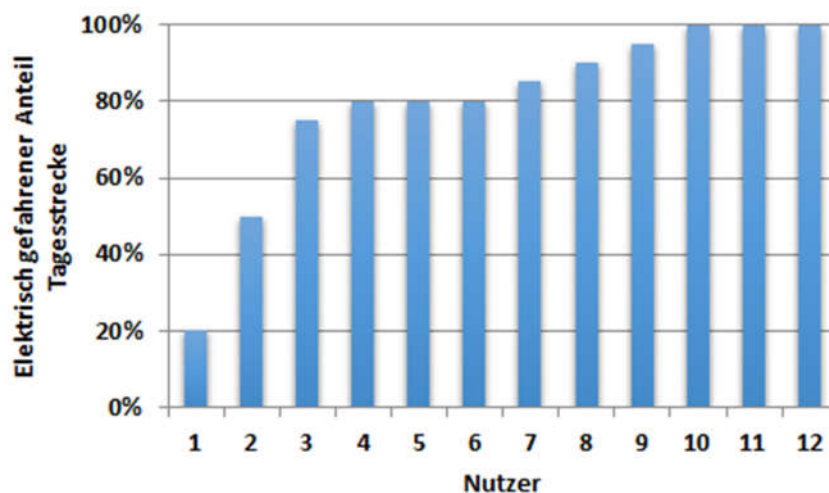


Abbildung 5: Elektrisch gefahrener Anteil der täglichen Strecke (Nutzer-Angabe)

Passend dazu geben 6 Nutzer als Motivation für Ihre Fahrt an, einen möglichst hohen elektrischen Fahranteil erreichen zu wollen.

Die von den Nutzern angegebenen Jahresfahrleistungen reichen von 9.000 km/a bis 45.000 km/a (Abbildung 6) mit einem Mittelwert bei 18.250 km/a bzw. einem Median von 22.600 km/a.

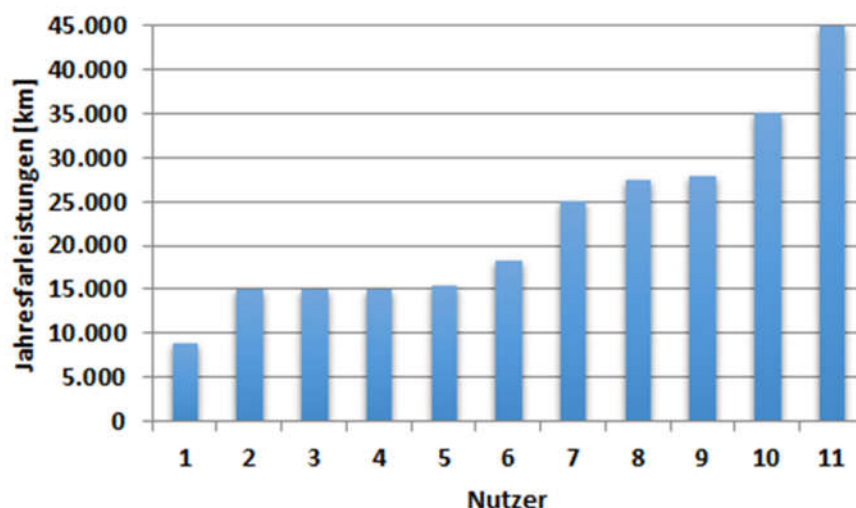


Abbildung 6: Jahresfahrleistungen nach Nutzerangaben (Schätzung)

10 der Befragten geben an, hauptsächlich eine bestimmte Betriebsstrategie in ihrem Fahrzeug zu wählen, davon sechs eine „ECO“-Betriebsstrategie (Tabelle 14). Allerdings führen hierbei zwei Fahrer eines Mitsubishi Outlander Plugins an, dass der Verbrauch im „ECO“-Modus gleich oder höher als im normalen Modus sei.

Tabelle 14: Gewählter Fahrzeugmodus

Fahrzeugmodell	Modus	Anzahl
Audi A3	Auto	1
	ECO	1
BMW i8	Normal	2
	Elektromodus	1
	ECO Pro	1
Mitsubishi Outlander Plugin ⁶	ECO	5
	Normal	4

Nach ihrem geschätzten streckengebundenen Energiebedarf (Benzin bzw. Strom pro 100 km) befragt, konnten sieben Nutzer eine Angabe machen (Tabelle 15). Eine App zur Aufzeichnung der Verbrauchswerte wird nur von einem BMW i8-Fahrer eingesetzt, alle anderen geben an, solche Dienste nicht zu nutzen.

Tabelle 15: Energiebedarf Benzin/Strom nach Strecke (eigene Angaben der Befragten)

Fahrzeugmodell	Energiebedarf Benzin [l/100 km]	Energiebedarf Strom [kWh/100 km]
Audi A3	6,8	40
BMW i8	2,9	16,1 ⁷
	7,3	4,2
	7,2	4,0 ⁸
	6,5	25
Mitsubishi Outlander Plugin	7-10 ⁹	20
	3,9	15

Drei der Nutzer, die Angaben zum geschätzten streckengebundenen Energiebedarf machten, fahren einen Mitsubishi Outlander Plugin. Hierfür wurde der jeweilige kombinierter Energiebedarf Benzin/Strom in Abbildung 7 gegeneinander aufgetragen. Würde es sich tatsächlich um kombinierte Werte handeln, die beispielsweise über einen bestimmten Zeitraum die getankten Liter, die geladenen Kilowattstunden und die gefahrene Kilometer

⁶ Mehrfachnennungen

⁷ Fahrer verwendet eine App zur Überprüfung der Verbrauchswerte

⁸ Der Nutzer gab an, bei der letzten Fahrt 33,7 kWh/100 km im Stadtverkehr und 3,3 l Benzin/100 km benötigt zu haben

⁹ Der Nutzer gab an, bei 4.000 km Laufleistung nur viermal getankt zu haben

beinhalten, wäre ein Wertebereich zwischen ca. 20-30 kWh/100 km und ca. 0 l/100 km auf der einen Seite (rein elektrisch) und ca. 7-9 l/100 km und ca. 0 kWh/100 km¹⁰ auf der anderen Seite (mit Verbrennungsmotor) zu erwarten. So gab ein Fahrer an, bei 4.000 km Laufleistung nur viermal getankt zu haben (s. Fußnote 9). Unter der Annahme, dass jeweils 20 bis 45 Liter getankt wurden¹¹, ergeben sich 2 bis 4,5 l Benzin/100 km, die dann wieder eher in den erwartbaren Wertebereich fallen würden.

Laut Spritmonitor¹² liegen durchschnittliche Benzinverbrauchswerte für dieses Fahrzeug bei maximal 8,3 l/100 km. Stromverbrauchswerte werden von den Nutzern hier weniger häufig angegeben, und Ihre Analyse ist aufgrund der Spritmonitor-Datenstruktur aufwändiger. Die Stichprobe eines Nutzers, der einen Großteil seiner Strecken hauptsächlich elektrisch fährt, zeigt, dass dessen elektrischer Energiebedarf bei maximal 23,2 kWh/100 km liegt.

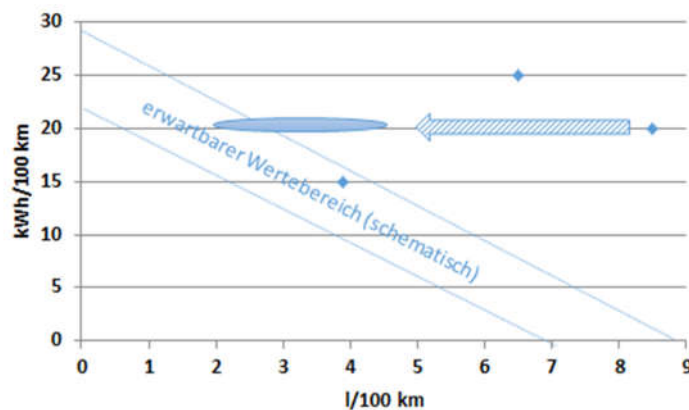


Abbildung 7: Kombiniertes Energiebedarfsdiagramm Mitsubishi Outlander Plug-in nach Nutzerangaben (Schätzung)

Bei der Umfrage zeigten sich 8 der Befragten mit den Angaben der Hersteller zu den elektrischen Reichweiten zufrieden, 3 zeigen sich unzufrieden (Tabelle 16). Die Fahrer des Modells Mitsubishi Outlander Plug-in scheinen am zufriedensten mit den Reichweitenangaben zu sein, allerdings ist die Stichprobe zu klein, um wirklich modellbezogene Aussagen treffen zu können.

¹⁰ Hier in Bezug auf Stromverbrauch ab Netz (fahrzeugextern), Rekuperieren, elektr. boosten etc. findet fahrzeugintern unabhängig davon statt

¹¹ Entspricht dem halben bzw. dem ganzen Tankvolumen [6]

¹² [7] ;Baujahr 2014 – 2016

Tabelle 16: Zufriedenheit mit Reichweitenangaben des Herstellers

Sind Sie mit den Angaben des Herstellers bzgl. der elektrischen Reichweite zufrieden?	Ja (Anzahl)	Nein (Anzahl)
Audi A3	2	-
BMW i8	2	2
Mitsubishi Outlander Plugin	4	1

Die Unzufriedenheit wurde mit folgenden Aussagen begründet:

- „Hersteller [Mitsubishi] gibt bis zu 52 km rein elektrisch an – in der Praxis mit Klima, Heizung usw. sind max. 30-35 km möglich, selbst bei schonendster Fahrweise.“
- „Reichweite elektrisch nur 20 km“

Aber auch diejenigen, die zufrieden sind, haben ähnliche Anmerkungen:

- „Jedoch abgefunden damit, dass die angegebene Reichweite nicht darstellbar ist“
- „50 km elektrische Reichweite bei richtiger Anwendung“

Zusammenfassend lässt sich aus der Umfrage feststellen, dass 11 der 12 Befragten sich generell mit ihren Plug-in Hybriden zufrieden zeigen, auch wenn für einige Nutzer die eingeschränkte elektrische Reichweite ein Thema ist. Die 12 Fahrzeuge (6 Mitsubishi Outlander Plugin, 4 BMW i8, 2 Audi A3 etron) sind mit einer Ausnahme alle gewerblich zugelassen, darunter werden 7 Dienstwagen-PHEV auch privat genutzt. Die angegebenen Jahresfahrleistungen reichen von 9.000 km/a bis 45.000 km/a, mit einem Mittelwert (Median) bei 18.250 (22.600) km/a.

Geladen wird überwiegend daheim, und zum Großteil direkt nach der Nutzung. Die Ladezeiten der „Daheimladenden“ sind folglich eher abends/nachts zu erwarten. Unter denjenigen, die auf dem Firmengelände laden, haben drei Nutzer eine Photovoltaik-Anlage installiert. Geplantes Laden (gezieltes Lademanagement) ist für keinen der Teilnehmer ein Thema. Die Analyse der täglichen Fahrzeugnutzung mit einer Dauer von 1-2 Stunden am Tag zeigt jedoch, dass das Potential für gesteuertes Laden/mobile Speicherfunktionen bestünde (Stichwort Sektorkopplung Energie und Verkehr). Das „Auswärtsladen“ scheint momentan noch eine deutliche Hürde darzustellen, sei es durch den zusätzlichen Zeitaufwand, sei es durch andere Zugangsbedingungen zu den Ladesäulen oder unterschiedliche Ladestandards (CHAdeMO, CCS), sei durch die Tatsache, dass das Fahrzeug immer die Rückfalllösung Verbrennungsmotor bietet. Diese Hürde ist nicht kostenmotiviert.

Die täglich gefahrenen Strecken sind größtenteils kürzer als 20 km (7 Nennungen) und zwischen 20 und 50 km (5 Nennungen). Dies liegt deutlich unter der Strecken die in einem typischen normkonformen RDE-Zyklus zurückgelegt wird. Dazu passend schätzt die Mehrheit der Befragten ein, ihre tägliche Strecke überwiegend im elektrischen Fahrmodus zurückzulegen, und sind entsprechend motiviert, einen möglichst hohen elektrischen Fahranteil zu erreichen. Die Hälfte der Befragten nutzt standardmäßig einen „Eco“-Fahrzeugmodus, mit dem ein höherer elektrischer Fahranteil erreicht werden kann. Hier spielt jedoch maßgeblich die Auswahl der Befragten eine Rolle, da es sich hierbei aus-

schließlich um „first mover“ handelt, die aus gezieltem Interesse an elektrischem Fahren an dem Projekt InitiativE BW teilgenommen haben. Eine App zur Aufzeichnung und Nachverfolgung des fahrzeugbezogenen Energiebedarfs pro Strecke (kWh/100 km bzw. l/100 km) nutzt nur einer der Befragten. Demzufolge zeigt sich seitens der Befragten in der Angabe ihres durchschnittlichen streckenbezogenen Energiebedarfs (Strom/Benzin) auch eine hohe Unsicherheit mit z.T. unplausiblen Wertepaaren. Eine fundierte Datenerhebung zur Erfassung der getankten Liter Kraftstoff, der geladenen kWh Strom und der jeweils gefahrenen Kilometer über einen bestimmten Zeitraum ist durch eine solche Befragung nicht zu ersetzen.

Die Umfrage zeigt, dass das Nutzerverhalten von PHEV-Fahrern den elektrischen Fahrzeugpart der Hybridfahrzeuge im Wesentlichen nicht als Boost/Rekuperation-Funktion nutzt, sondern diesen auch über elektrisches Vollladen der Batterie hauptsächlich für elektrisches Fahren einsetzt. Dies ist vor allem von Bedeutung bei der Ermittlung der Emissionskennzahlen, um damit auch Aussagen zu Umweltbelastung modellieren zu können. Auch die eingesetzten Fahrmodi der PHEV-Fahrer zeigen ein bewusstes Einsetzen des Elektroanteils der Fahrzeuge.

4 Messmittel

Die Fahrzeuge wurden umfangreich mit Messtechnik in den elektrischen, thermischen und Kraftstoff-Kreisen ausgestattet, siehe

Abbildung 8.

Dies erlaubt es, bei normkonformen Fahrzyklen am Prüfstand, bei RDE Messungen mit PEMS-System und Kraftstoffverbrauchsmessung Daten zu gewinnen, um diese hinsichtlich Fahrzeugbetriebsstrategie, Fahrverhalten, Hochvoltverbrauchern und Emissionen zu analysieren und auszuwerten. Insgesamt wurde 17 Temperaturen, 8 elektrische Ströme, 5 Spannungen, 2 Feuchten, einmal Druck und einmal Durchfluss sowie mehrere GPS-Signale über einen Datenerfassung aufgezeichnet. Parallel dazu wurden die internen Messwerte der Fahrzeuge über OBD mitgeloggt.

Bei jeder Messfahrt wurde aufgezeichnet:

- Hochvolt-Batteriestrom und Hochvolt-Batteriespannung
- Strom vom HV in das 12V System über DC/DC Wandler
- Spannung 12V System
- Netz-Ladestrom und Netz-Ladespannung
- GPS Daten (Geschwindigkeit, Zeit und Strecke)
- Temperaturen im gesamten Abgasstrang
- Temperatur des Motoröls
- Temperaturen im Innenraum
- Innenraumfeuchte
- Kühlmitteltemperatur der Hochvolt-Batterietemperierung
- Umgebungsdaten (Luftdruck, Feuchte und Temperatur)
- Strom HV - PTC Heizer und HV - Klimakompressor
- Kraftstoffdurchfluss

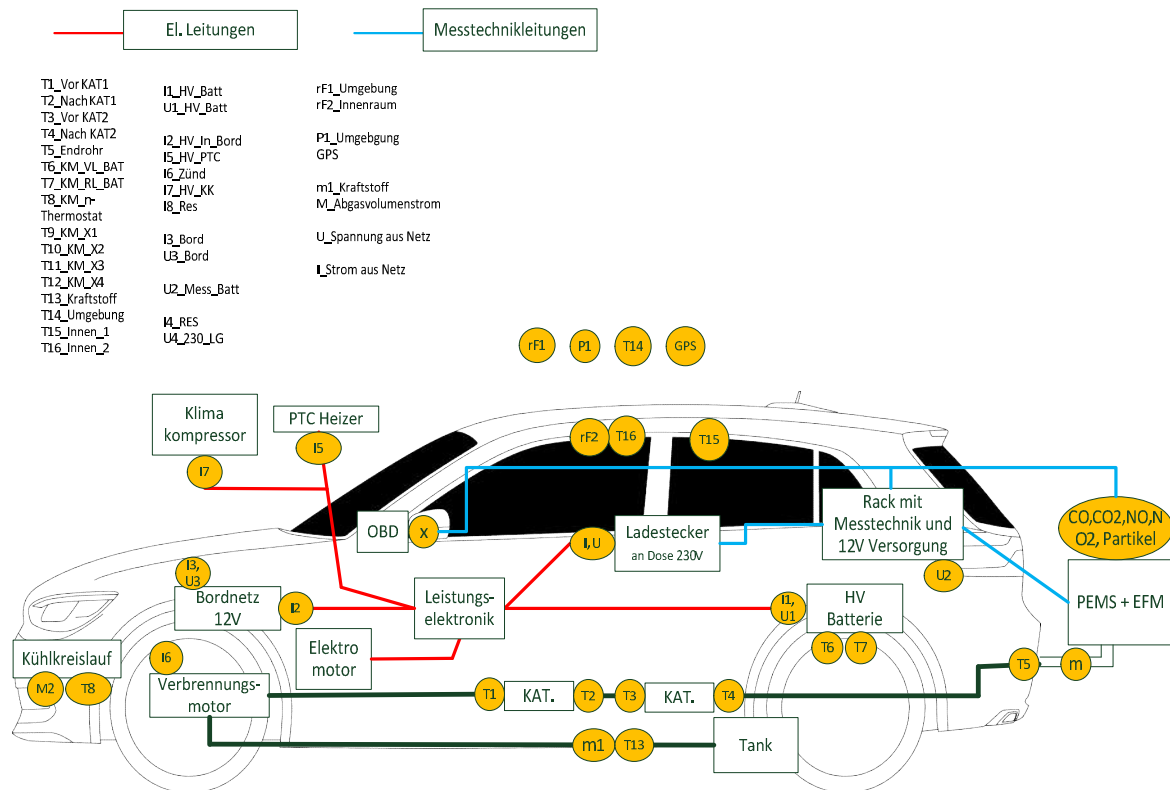


Abbildung 8: Sensorübersicht der Projektfahrzeuge

4.1 Temperaturmessung

Die Temperaturmessungen im Abgasstrang (vor Katalysator, nach Katalysator, am Endrohr und am Krümmer) und im Kühlmittel der Batterietemperierung erfolgen mit Thermoelementen vom Typ K. Die Temperatur des Kraftstoffes in der Kraftstoffleitung, zur Durchführung der Volumenkorrektur des Kraftstoffdurchflusses, wurde ebenfalls mit einem Thermoelement gemessen. Die Temperaturmessung des Innenraumes, der Umgebungstemperatur sowie die des Motoröls wurden mit PT100 Sensoren durchgeführt.

4.2 Mobile und stationäre Abgasmessung (PEMS)

Für die on-road-Emission- und Partikelmessung kam das mobile, von DEKRA geprüfte und abgenommene PEMS-Kombi Abgasanalysesystem des Herstellers AIP GmbH zum Einsatz (Abbildung 9). Das Gerät besteht aus: Gasmesstechnik für CO, CO₂, NO und NO₂, einem Partikelzähler für feste Partikel, einem GPS-Modul sowie einer dazugehörigen Steuerungs- und Bediensoftware. Die PEMS bietet desweiteren Schnittstellen für externe Anschlüsse.

Als Gasmesstechnik zur Abgasmessung sind in der PEMS drei Gasanalysatoren verbaut: ein Chemilumineszenz-Detektor (CLD), einen photoakustischen Sensor (PAS) und ein nicht-

dispersiver Infrarotsensor (NDIR) (Funktionsbeschreibung s.u.). Der Chemilumineszenz-Detektor dient der Bestimmung der NO-Konzentration im Abgas. Die Bestimmung der NO₂-Konzentration erfolgt über den photoakustischen Sensor und über den nicht-dispersiven Infrarotsensor wird die CO- sowie die CO₂-Konzentrationen im Abgas gemessen. Die Emissionen werden dabei als Stoffmengenanteile im Abgas in ppm (parts per million) bestimmt. Die Partikelmessung erfolgt bei der PEMS mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC). Über Schnittstellen sind ein Abgasmassenstrommesser (EFM), eine Wetterstation zur Bestimmung der Luftfeuchte und der Umgebungstemperatur sowie ein GPS-System mit der PEMS verschaltet.

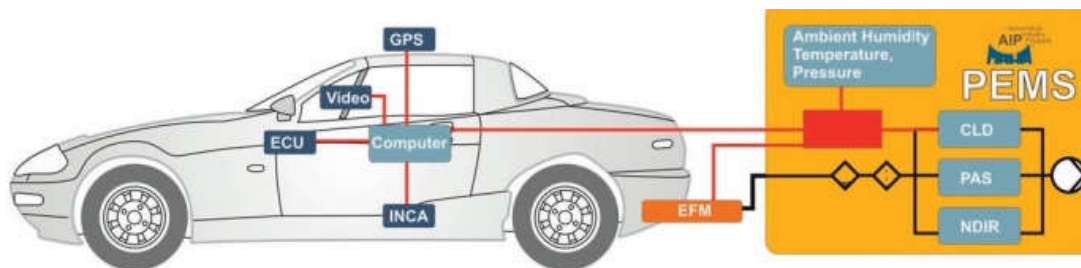


Abbildung 9: PEMS Aufbau – Schematische Darstellung [8]

Der Chemilumineszenz-Detektor (CLD) zur Messung von Stickoxiden (NO) verwendet eine Photo-Diode zur Überwachung der Reaktion zwischen NO und O₃. Das Ozon wird im sogenannten Ozonator aus Sauerstoff gewonnen. Die ablaufende Reaktion im Detektor führt zur Abgabe von Lichtphotonen. Die Anzahl der abgegebenen Photonen ist proportional zur NO-Konzentration. Sollen die gesamten Stickoxide (NO_x) gemessen werden, so wird die Probe durch einen Konverter geführt, in dem NO₂ zu NO reduziert wird (Abbildung 10, [9]).

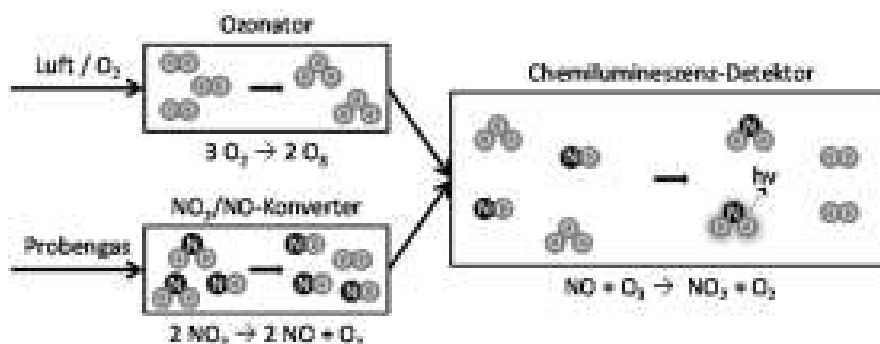


Abbildung 10: Funktionsprinzip eines Chemilumineszenz-Detektors [9]

Beim nicht-dispersiven Infrarotsensor (NDIR) macht man sich hier zu Nutzen, dass einige chemische Verbindungen abhängig von derer Bindung im Infrarotbereich Licht absorbieren, z.B. gilt dies für NO. Die Messeinrichtung besteht aus zwei Zellen mit jeweils einem Gasdetektor. Die beiden Detektoren sind mit über eine bewegliche Membran miteinander verbunden. Bei der Messung wird die Probe in eine der beiden Zelle geleitet. Die zweite

Zelle dient als Referenzzelle. Beide Zellen werden mit einem breiten Spektrum von Infrarotstrahlung durchstrahlt. Sind beide Kammern mit der gleichen Konzentration des zu messenden Gases gefüllt, so wird in der Messzelle die gleichen Wellenlängen und bei der gleichen Konzentration auch mit der gleichen Intensität wie in der Referenzzelle das Infrarotspektrum absorbiert. Ist die Messzelle leer, so trifft die gesamte Infrarotstrahlung in den Detektor und wird dort absorbiert. Durch die Absorption im Gasdetektor steigen in diesem die Temperatur und somit der Druck an. Befindet sich Abgas in der Messzelle, so wird schon in der Messzelle Infrarotlicht absorbiert und es trifft weniger Infrarotstrahlung in die Kammer des Detektors. Somit sind dann Temperatur- und Druckanstieg geringer als in der Detektorkammer der Referenzzelle. Je größer die Konzentration des zu messenden Gases ist, desto größer ist die Druckdifferenz zwischen den beiden Kammern. Die zu messende Größe ist somit der Druckunterschied. Die Druckdifferenz wird über die bewegliche Membran zwischen den beiden Kammern, die sich unterschiedlichen Drücken in den beiden Detektorkammern durchbiegt gemessen (Abbildung 11, [10]).

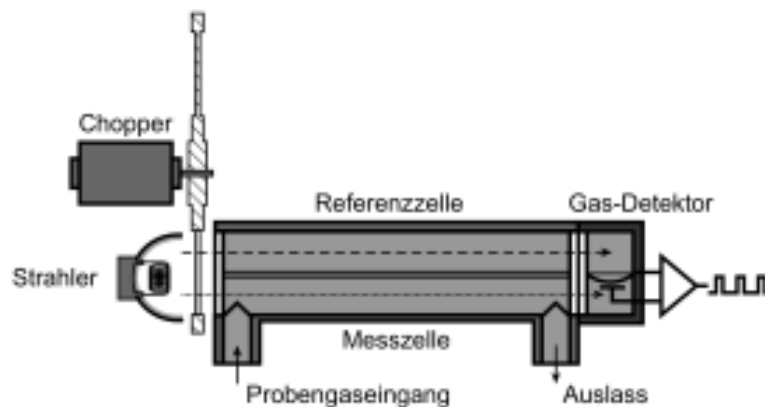


Abbildung 11: Funktionsprinzip eines nicht-dispersiven Infrarotsensors [10]

Der in der PEMS verbaute photoakustische Sensor (PAS) nutzt den photoakustischen Effekt in einem 2-Kammer-System, um die NO_2 -Konzentration im Abgas zu bestimmen. Das System besitzt eine Detektions- und Messkammer. Die Abbildung 12 zeigt die schematische Darstellung des photoakustischen Sensors im 2-Kammer-Aufbau ohne (oben) und mit (unten) Messgas in der Absorptionsstrecke. Im oberen Fall, also ohne Messgas, ist die modulierte Infrarotstrahlung des thermischen Emitters in der Detektionskammer maximal. Daher ist auch der photoakustische Druck in diesem Fall maximal. Im unteren Fall, mit Abgas, wird auf der Absorptionsstrecke bereits die Infrarotstrahlung mit der für diese chemische Bindung spezifischen Wellenlänge absorbiert. Dadurch erfasst die Detektionskammer ein reduziertes Messsignal und der photoakustische Druck sinkt [11].

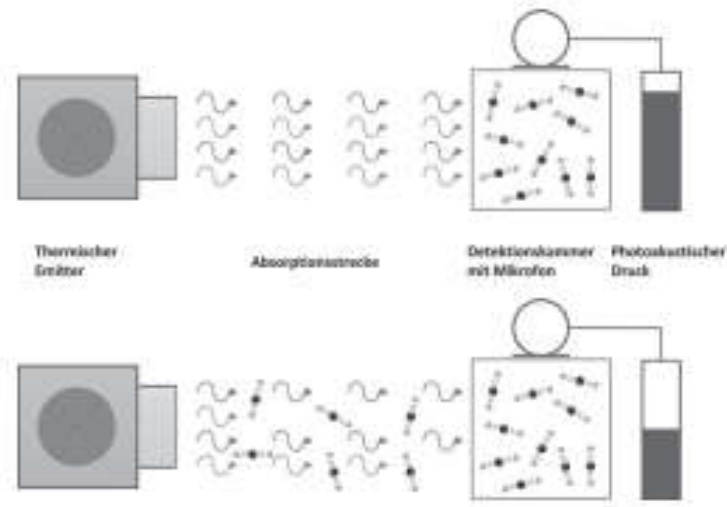


Abbildung 12: Funktionsprinzip eines photo-akustischen Sensors ohne und mit Messgas [11]

Die Partikelmessung erfolgt bei der PEMS mittels eines Kondensationspartikelzähler (CPC). Die Messung der Anzahl der Partikel erfolgt hierbei mit einem Laser. Da die Streuung von Licht der ultrafeinen Partikel beim Durchgang durch einen Laserstrahl nur sehr gering ist und dadurch keine optische Messmethode ohne großen Messfehler angewandt werden kann, werden die Partikel vorkonditioniert. Dabei werden die Partikel stark vergrößert. Dies geschieht durch Kondensierung einer Arbeitsflüssigkeit in einer übersättigten Umgebung. Die eigentliche Partikelzählung findet schließlich im Optikblock des CPC statt [12].

Bei der Emissionsmessung auf dem Rollenprüfstand wurde sowohl mit der PEMS als auch parallel dazu mit einer MEXA (Motor-Exhaust-Gas-Analyser) der Firma Horiba gemessen. Die Messungen der Abgase in der MEXA werden als Rohgasmessungen mittels eines Fourier-Transformationsinfrarotspektrometers (FTIR) bestimmt. Unter Verwendung der Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie misst die MEXA-6000-FT gleichzeitig Konzentrationen mehrerer Komponenten, einschließlich NH_3 , N_2O , CO , CO_2 , NO und NO_2 , in unverdünntem Abgas. Zudem können mit der MEXA zusätzlich unverbrannte Kohlenwasserstoffe erfasst werden. Zur Ermittlung volumenbezogener bzw. Absolutwerte der Abgasemissionen wurde am Prüfstand zusätzlich noch ein SICK-Niederdruck Abgasvolumenstrom Ultraschall-Messgerät eingesetzt. Der Einsatz beider Messgeräte ermöglicht ein Abgleichen und somit eine fundierte Verifikation der Messergebnisse.

4.3 Kraftstoffverbrauchsmessung

Für die Kraftstoffverbrauchsmessung wurde das flowtronic S8005C der Firma Gregory eingesetzt. Das Messgerät ist für einen Temperaturbereich von -20°C bis $+70^\circ\text{C}$ geeignet, hat einen Messbereich von 0,1-150 l/h und eine Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ des Messwertes. Die Messanordnung ist wie in Abbildung 13 dargestellt angeordnet.

Um die rechnerische Voluminanormierung durchführen zu können, wird für die Kraftstofftemperaturmessung ein in das Messsystem integrierter PT100 verwendet. Das Messgerät

wurde in jedem Fahrzeug an der Kraftstoffleitung zwischen Tank und Motor angebracht (s. Abschnitt 5).

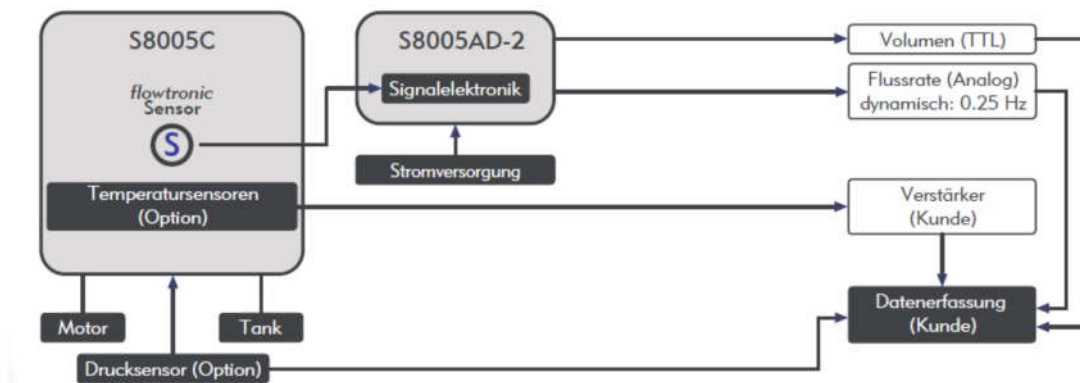


Abbildung 13: Messanordnung für die Kraftstoffverbrauchsmessung

4.4 OBD

Die Aufnahme der internen Fahrzeugdaten erfolgte über die OBD-Schnittstelle sowohl über das PEMS Messgerät als auch über einen IMC Datenlogger mit integrierter Datenaufnahme.

OBD	VW	BMW	Daimler
Status Einspritzsystem Bank 1			
Angeforderte Last	x	x	x
Temperatur Kühlwasser	x	x	x
Berechnete Last			
Drehzahl	x	x	x
Gaspedalstellung			
Geschwindigkeit	x	x	x
Zeit seit Motorstart [s]			
Drosselklappenstellung			
Einlass-Lufttemperatur			
Einlass-Luftdruck			
Bordnetzspannung (OBD Buchse)			
Kraftstoffdruck (Rail)			
Luftmenge (MAF Sensor)			
Motoröltemperatur			
Lambdawert Bank 1 Sensor 1	x	x	x
Verbrauch (berechnet)	x	x	x
Katalysatortemperatur	x		

Je nach Fahrzeug war es möglich, verschiedene in der Tabelle aufgeführte OBD-Größen aufzuzeichnen. Aufgrund der hohen Latenzzeiten des Steuergerätes bei der Abfrage aller Messwerte wurde sich auf die wichtigsten und unbedingt notwendigen beschränkt. Da im OBD-Standard zum jetzigen Zeitpunkt keine energierelevanten Größen wie beispielsweise der Ladezustand der Hochvoltbatterie, Alterungszustand der Batterie etc. vorgeschrieben sind, standen diese Werte nicht über OBD zur Verfügung.

4.5 Rollenprüfstand

Zur Durchführung der normkonformen Emissions- und Verbrauchsmessungen in den Standardzyklen NEFZ und WLTC wurde der Allrad-Rollenprüfstand mit Klimatisierung und Abgasanalyse im DLR-FK Stuttgart eingesetzt. Um mögliche systematische Abweichungen der Emissionen und Verbräuche auf Prüfständen ermitteln zu können, wurden zusätzlich zu den normkonformen Emission- und Verbrauchsmessungen nicht nur die Standardzyklen wie NEFZ und WLTC bei verschiedenen Temperaturen auf dem Prüfstand gefahren, sondern auch die durchgeführten RDE-Realfahrten mit Geschwindigkeit, Steigung und Temperatur aufgenommen und unter gleichen Bedingungen als Simulation der realen Fahrt auf dem Rollenprüfstand nachgefahren und Messergebnisse analysiert. Weiterhin erfolgte während der Prüfstandsmessungen eine Korrelation und Verifikation des PEMS Messergebnisses durch die Parallelmessung mit einem FTIR-Gerät.



Abbildung 14: Rollenprüfstand DLR Stuttgart

Der Prüfstand ist zusätzlich für Wasserstoffverbrauchsmeasurements ausgestattet und ermöglicht Untersuchungen für Kaltstarttests, Komponentencharakterisierung, Thermomanagementuntersuchungen und Abgasmeasurements.

Die technischen Daten des klimatierbaren Rollenprüfstands mit Abgasanalyse sind in Tabelle 17 dargestellt. Der Prüfstand ist zertifiziert und hat 2018 vom TÜV eine Genehmigung erhalten, um Norm-Messungen für Elektrofahrzeuge gemäß des neuen Zyklus WLTC durchführen zu können.

Tabelle 17: Technischen Daten des Klima-Rollenprüfstands mit Abgasanalyse

Hersteller Rollenprüfstand	MAHA
Hersteller Klimakammer	TIRA Umweltsimulation
Geschwindigkeit	0-200 km/h
Antriebsarten	Front-, Heck-, Allrad-, Hybridantriebe / Einzelrad (FWD/RWD/4WD)
simulierbare Fahrzeugmassen	450 kg – 4500 kg
Radstandsverstellbereich	1,6 m – 4 m
Temperaturbereich Klimakammer	-40°C bis +60°C
Feuchtebereich	0-80%rF
Steigung	0-30%
Fahrtwindgebläse	0-135 km/h, höhenverstellbar
Leistung	100 kW pro Rolle

In Tabelle 18 sind die wichtigsten Messgrößen für die RDE- und Labormessungen aufgelistet. Zu beachten ist, dass bei den RDE Messungen nicht alle Schadstoffe, die auch das FTIR-Gerät erfasst, gemessen werden können.

Tabelle 18: Übersicht über die wichtigsten Messgrößen für RDE und Labormessungen

Typ	Messgröße	
Schadstoffe	Stickoxide (NO _x , NO, NO ₂)	Ethan (C ₂ H ₆)
	Kohlenmonoxid (CO)	Ethen (C ₂ H ₄)
	Schwefeldioxid (SO ₂)	Propen (C ₃ H ₆)
	Ammoniak (NH ₃)	1,3-Butadien (1,3-C ₄ H ₆)
	Summe der Kohlenwasserstoffe (HC Sum)	Isobutene (iso-C ₄ H ₈)
	Acetaldehyd (CH ₃ CHO)	Benzol (C ₆ H ₆)
	Isopren (C ₅ H ₈)	Toluol (C ₇ H ₆)
	Formaldehyd (HCHO)	Wasser (H ₂ O)
	Ameisensäure (HCOOH)	
Treibhausgase	Kohlendioxid (CO ₂)	Distickstoffoxid (N ₂ O)
	Methan (CH ₄)	
Feinstaub	PN	
	PM (berechnet)	
Fahrzeugdaten	Geschwindigkeit	Abgastemperatur
	Kraftstoffverbrauch	Batteriestrom und -spannung
	Luft- Kraftstoff-Verhältnis	Batterietemperatur
	Katalysator-Temperatur	Ladestrom und -spannung

4.6 Datenverarbeitung

Um die erfassten Daten zu analysieren, wurden die einzelnen Messdateien der verschiedenen Messgeräte zusammengeführt (Abbildung 15). Hierfür werden alle Daten zu einer Gesamtdatei mit gleicher Zeitbasis zusammengefasst. Das heißt, die PEMS Messung wurde mit den Daten aus der Fahrzeugmesstechnik und im Falle der Prüfstandsmessung zudem mit den FTIR- und Rollenprüfstandsdaten synchronisiert. Anschließend wurde für jede Messung eine Drehzahlkorrektur vorgenommen. Beträgt die Motordrehzahl Null, ist der Verbrennungsmotor also nicht aktiv, werden die Emissionskonzentrationen ebenfalls als Null berechnet. Die gleiche Korrektur wurde mit dem Abgasmassenstrom durchgeführt.

Anschließend werden die Messungen hinsichtlich der Geschwindigkeitsverteilung nach speziellen Fahrsituationen analysiert. Bei RDE-Fahrten wird zwischen „Urban“, „Rural“ und „Highway“ unterschieden. Ist die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ≤ 60 km/h, so werden die hier ausgestoßenen Emissionen der Urban-Klassifizierung zugeordnet. Eine Zuteilung zu „Rural“ findet bei Geschwindigkeiten ≥ 60 km/h und ≤ 90 km/h statt. Bei Geschwindigkeiten > 90 km/h wird der Streckenabschnitt der Sektion „Highway“ zugeteilt. Handelt es sich bei dem Rollentest um einen WLTC, so wird eine Einteilung in „Low“, „Medium“, „High“ und „Extra High“ durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit mit den RDE-Fahrten sicherzustellen, werden die Bereiche „Low“ und „Medium“ als „Urban“ zusammengefasst. Die Teile „High“ und „Extra High“ werden entsprechend „Rural“ und

„Highway“ zugeordnet. Beim NEFZ wird keine Verteilung nach Geschwindigkeiten vorgenommen und somit die Emissionen des gesamten Tests betrachtet.

Da RDE-Fahrten nicht in einer definierten und vorkonditionierten Prüfstands Umgebung stattfinden, treten Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugen, Fahrern und Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Temperatur und Verkehrsaufkommen auf. Zur Kompensation dieser Einflüsse kommen in der Typprüfzulassung zwei Methoden zum Einsatz. Zum einen gibt es die von dem Joint Research Centre (JRC) der europäischen Kommission entwickelte EMROAD-Methode, zum anderen die von der TU Graz realisierte CLEAR-Methode. EMROAD nutzt den "Moving Averaging Window"-Ansatz. Dabei basiert die Länge jedes Fenster auf der Menge der CO₂-Emission während eines WLTC. Ein Fenster ist definiert als die Hälfte der kumulierten CO₂-Menge eines WLTC. Die Emissionen eines Fensters berechnen sich aus der kumulierten Masse über die Länge des Fensters. Das Ergebnis ist somit eine durchschnittliche Emission in g/km für jedes Fenster [3]. Das Bewertungstool CLEAR basiert auf der "Power Binning Methode". Dabei werden die Schadstoffemissionen in Leistungsklassen entsprechend ihrer Leistung an den Rädern des Testfahrzeugs eingeteilt und anhand einer Soll-Häufigkeitsverteilung der Leistungsanforderung gewichtet [3]. Da zum einen zum Zeitpunkt der Durchführung des Projekts keine Vorgaben für die Normalisierung der Emissionen bei PHEVs existiert haben und zum anderen die tatsächlichen Spannbreiten der realen Emissionen im Mittelpunkt der Analyse stehen, wird im Folgenden auf die Darstellung dieser Auswertungsansätze verzichtet.

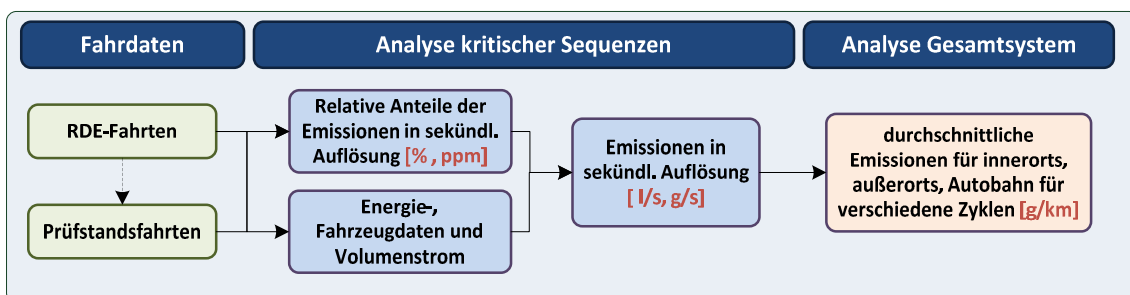


Abbildung 15: Auswertungspfad zur Ermittlung der absoluten Emissionen in einem Fahrzyklus

5 Umbau der Fahrzeuge

5.1 Ausnahmegenehmigung

Werden Eingriffe oder Veränderungen an Fahrzeugen durchgeführt, so erlischt die allgemeine Betriebserlaubnis der Fahrzeuge. Für die Projektfahrzeuge waren sowohl Umbauarbeiten sowie Messtechnikintegration als auch Eingriffe ins Hochvolt-, Kühl-, Abgas-, Steuer- und Kraftstoffsystem vorgesehen. Dies bedingte somit den Bedarf von Ausnahmegenehmigungen für den Betrieb der Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen zur Durchführung der geplanten RDE-Messungen. Die Erteilung der Ausnahmegenehmigung setzt u.a. ein TÜV-Gutachten voraus, das die Überprüfung der Personalqualifizierung, des Equipment und der Werkstattausrüstung sowie die Einhaltung von Prozessabläufen beinhaltet und diese bescheinigt. Abbildung 16 zeigt die für Ausnahmegenehmigungen qualifizierte und vom TÜV abgenommene Werkstatt des DLR-FK mit einem der Projektfahrzeuge auf der Hebebühne.



Abbildung 16: Für den Umbau vorbereitetes Fahrzeug auf der Hebebühne

Die Ausnahmegenehmigungen wurden unter Vorlage des TÜV-Gutachtens für jedes der Projektfahrzeuge beantragt und durch die Bezirksregierung Köln für die durchzuführende Straßentests erteilt. Die Ausnahmegenehmigung beinhaltet unter anderem:

- Veränderung im Abgassystem, Veränderung des Abgasverhaltens, AU-Werte
- Veränderung am Kühlsystem
- Veränderung am Kraftstoffzufuhrsystem
- Eingriff bzw. Einbindung in das Fahrzeug-Bordnetz (OBD, Can-Bus), 12V System
- Eingriff bzw. Einbindung in das Hochvoltsystem , Antriebsstrang
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

5.2 Umbau der Fahrzeuge und Einbau Messtechnik

Der Einbau der vorgesehenen Sensoren (s. a. § 4) in die Fahrzeuge bedingt umfangreiche Umbaumaßnahmen der Versuchsträger. Aufgrund der hohen Komplexität und Packagingdichte sowie der Fehlerüberwachung aller relevanten Funktionen durch die Fahrzeugsteuerung, die bereits bei geringsten Eingriffen Systemabweichungen erkennt und in einen Fehlermodus geht, sind Modifikationen an modernen Fahrzeugen nur mit hohem Aufwand und gründlicher Planung durchführbar. Dazu wurden vorweg die Strom-, Steuerungs-, Schalt- und Packagingpläne der einzelnen Fahrzeuge beschafft, evaluiert und eine Messtechnikintegrationsfeinplanung für jedes einzelne Fahrzeug durchgeführt. Es wurden für jedes Fahrzeug Einbauorte für die zu integrierende Sensoren festgelegt sowie Messsignal- und Stromlaufpläne erstellt. Da die Konzepte und der Aufbau aller drei Fahrzeuge komplett verschieden ist, musste für jedes der Fahrzeuge ein komplett neuer Messkonzeptintegrationsplan entwickelt werden. Aufgrund der hohen Packagingdichte (im Speziellen beim BMW und Daimler) war zum Teil kein Raum für den Sensoreinbau verfügbar sowie die erforderlichen Positionen für eine Sensorplatzierung nicht zugänglich. Daher mussten die Fahrzeuge für die Ausstattung mit Messtechnik umfangreich auseinandergebaut, Leitungen aufgetrennt, abgeändert oder getauscht werden, neue Halterungen für Sensoren bzw. bei Umbaubedarf auch für Fahrzeugkomponenten konstruiert und in das Fahrzeug integriert werden. Die Auswirkungen auf die Fahrzeugsteuerung wurden mit einem Gutmanngerät überwacht, die jeweiligen Fehlercodes sowie Meldungen ausgelesen, ausgewertet und nach Eingriffen zurückgesetzt.

Alle Umbaumaßnahmen wurden von einem KFZ-Meister und einem Messtechnikingenieur begleitet. Arbeiten am Hochvoltssystem erfolgten prozesskonform mit entsprechend qualifiziertem Personal.



Abbildung 17: Messtechnikrack mit separater Batterie und Messwerterfassungseinheit

Das integrierte Messsystem beinhaltet neben der Energieversorgung der ins Fahrzeug eingebauten Sensoren für Drücke, Temperaturen, GPS, u.a.m. ein Datenerfassungssystem der Firma IMC mit Anschlüssen für den Fahrzeug-CAN-Bus und hochvoltsichere Spannungs-

eingängen für Messungen am Hochvoltssystem. Um den Einfluss der zusätzlich in die Fahrzeuge eingebaute Messtechnik so gering wie möglich zu halten, wurde jedes Messsystem mit einem eigenem Datenlogger sowie einer autonomen Datenspeichereinheit ausgestattet und über eine unabhängige 12 V Batterie autark betrieben. Die zur Versorgung der Messtechnik eingesetzte Batterie wurde zur Eigenüberwachung mit einer Spannungsmessung ausgestattet und kann bei Bedarf extern nachgeladen werden. Das so ausgestattete autonome Messerfassungssystem wurde im Kofferraum des jeweiligen Fahrzeugs in einem speziell dafür konstruierten und aufgebauten Messtechnikrack installiert (Abbildung 17).

5.2.1 Golf GTE

Der Golf GTE wurde als erstes Fahrzeug zum Umbau und Ausstattung mit Messtechnik vorgesehen und entsprechend wie eingangs beschrieben mit Messtechnik bestückt. Dem entsprechend wurden zunächst die dazugehörigen Schalt- und Montagepläne des Herstellers beschafft. Dies beinhaltet: Pläne zur Kraftstoffversorgung, Stromlaufpläne für das HV-System, Anleitungen zum Freischalten des Fahrzeuges für das hochvoltgeschulte Personal und Stromlaufpläne für das 12V System.

Der Golf ist von den drei Projektfahrzeugen am übersichtlichsten aufgebaut. Die meisten Hochvoltbauteile, wie der Inverter/Leistungselektronik, befinden sich gut sichtbar direkt im Motorraum und sind durch entsprechende orangefarbene Kabel leicht zu identifizieren (s. Abbildung 18). Der elektrische Klimakompressor und der PTC-Heizer sind ebenfalls vom Motorraum aus gut erkennbar untergebracht. Mit einer 8,7 kWh Batterie, die mittig unter dem Fahrzeugboden untergebracht ist, verfügt von den drei Versuchsfahrzeugen der Golf über die größte Hochvoltbatterie.



Abbildung 18: Motorraum des Golfs. In Draufsicht: Inverter/Leistungselektronik (Silberfarbe), Hochspannungskabel (orange) und Stromzange (blau oben)

Zur Bestimmung der elektrischen Energiebilanzen wurden auf der Hochvolt-Seite die Hochvoltbatterie mit Antriebsstrang, Leistungselektronik und e-Motor sowie die Nebenverbraucher PTC-Heizung, Klimakompressor und das 12V-Bordnetz erfasst. Dazu wurden die Hochvoltkabel an den entsprechenden Messpunkten (s. Abbildung 8) aufgetrennt, mit hochgenauen Stromzangen der Fa. LEM (Abbildung 18) sowie galvanisch getrennten Spannungsmessungen ausgestattet und messtechnisch erfasst.



Abbildung 19: Kupplungen und Leitungsverlängerung der Kraftstoff Hin- und Rückführung zum Kraftstoffmesssystem im Golf

Für die Kraftstoffmessung wurden die Kraftstoffleitungen des Hin- und Rücklaufs im Motorraum aufgetrennt und mit Kupplungen versehen (s. Abbildung 19). Das Kraftstoffmesssystem (flowtronic S8005C der Firma Gregory) musste aufgrund des nur knapp vorhandenen Bauraums im Motorraum vor dem rechten Vorderradkasten untergebracht und über die geschaffenen Abgriffe mit zusätzlichen Kraftstoffleitungen in den Hin- und Rücklauf des Kraftstoffsystems des Fahrzeugs eingebunden werden.

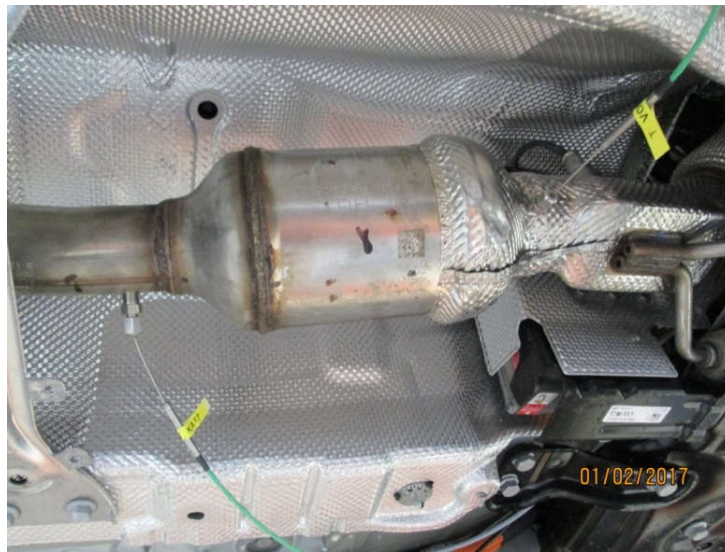


Abbildung 20: Eingebaute Temperatursensoren im Abgasstrang

Zur messtechnischen Charakterisierung des Abgasstrangs wurde dieser mit einem Differenzdrucksensor und mehreren integrierten Temperatursensoren ausgestattet. Es wurden Thermoelemente im Krümmer, vor und nach dem ersten als auch dem zweiten Katalysator und am Endrohr verbaut (s. Abbildung 20). Dazu wurden an den definierten Stellen Bohrungen durchgeführt und Verschrauber zur Einführung der Sensoren angeschweißt. Besonderes Augenmerk und erhöhten Aufwand erforderte der im Krümmer installierte Sensor. Dieser musste aufgrund der an dieser Position auftretenden hohen Temperaturen und Drücke sowie der doppelwandigen Ausführung des Krümmers besonders aufwändig angebracht und sowohl hitze- als auch druckbeständig ausgeführt und abgedichtet werden. An dieser Position treten bei Normzyklen Temperaturen von bis zu 600°C auf.

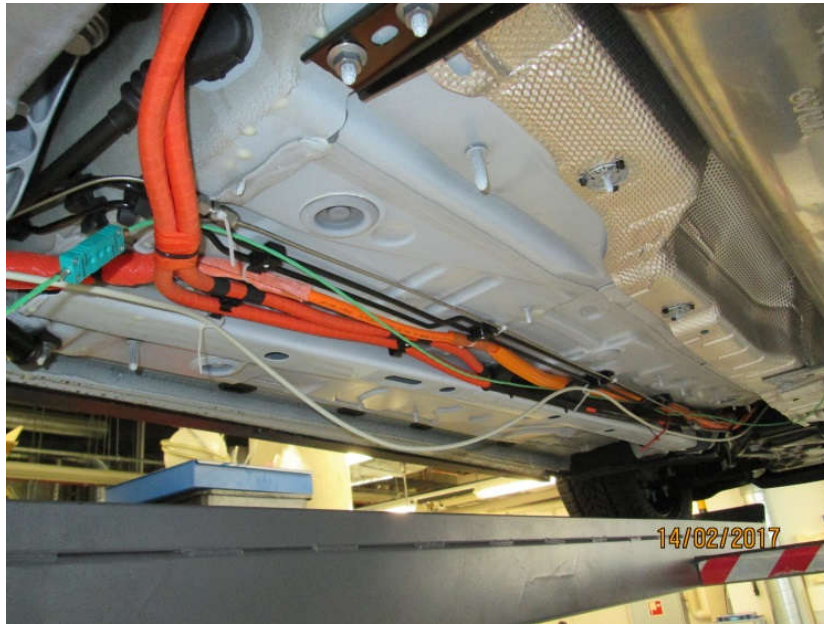


Abbildung 21: Führung von Mess- und Hochvoltleitungen im Unterboden des Golfs

Die Sensorkabel und Versorgungsleitungen der Messausstattung im Motorraum wurden unter der Bodenabdeckung, als zusätzliche Leitungen zu den Hochvoltkabeln, welche von der Batterie zu den Hochvoltkomponenten im Motorraum verlaufen, verlegt (Abbildung 21) und im Kofferraum im Messrack zusammengeführt und die Sensor- sowie CAN-Busleitungen auf dem Datenlogger aufgelegt.

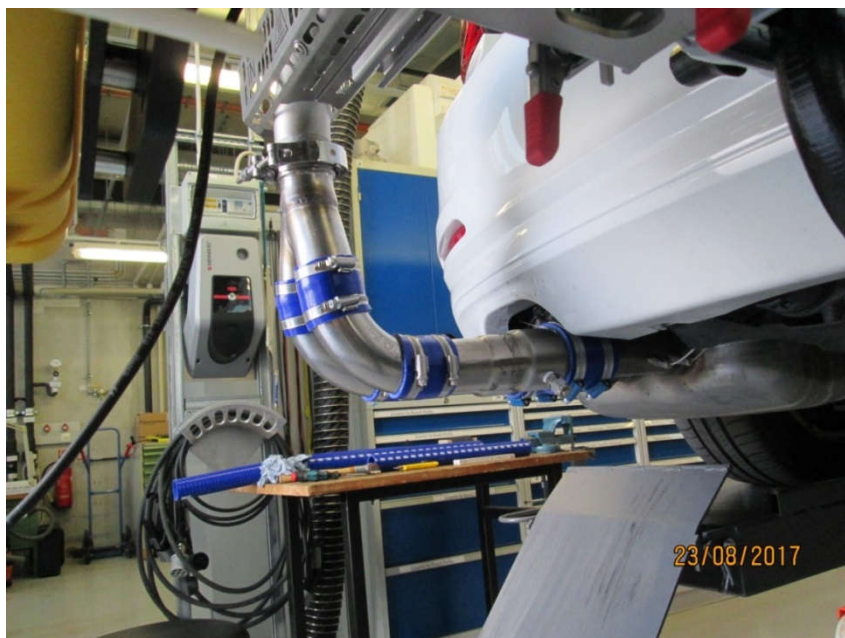


Abbildung 22: PEMS Endrohradapter am Golf

Zur Erfassung der Emissionen auf real gefahrenen Strecken (RDE) wurde zusätzlich eine PEMS installiert. Um das Abgas vom Doppelendrohr des Golfs in das Volumenstrommessgerät der PEMS zu leiten, wurde ein Spezialadapter aus VA-Stahl gefertigt, geschweißt

und verschraubt (Abbildung 22). Dabei wurde bei der Konstruktion ein Abgriff für das Abgasmesssystem im Rollenprüfstand vorgesehen und integriert. Der Aufbau wurde so ausgelegt, dass einerseits die Strecken, welche mit Silikonadaptern zu überbrücken waren, so klein wie möglich gehalten wurden, um messtechnische Fehler der Abgasanalyseeinheit in Folge von Ausdampfungen des Silikons vermeiden zu können. Andererseits musste sichergestellt werden, dass die angebauten Adapter luftdicht sind, da sonst Teile des Abgases entweichen und vom Volumenstrommessgerät nicht erfasst würden. Undichtigkeiten würden zu einem geringeren Volumenstrom und somit zu einer verfälschten Emissionsmessung führen.

5.2.2 BMW 330e

Der BMW 330e wurde nach Beschaffung von Hersteller-Bauplänen weitestgehend analog zum Golf GTE umgebaut und mit einem Messtechnikrack sowie einem Energieversorgungsrack zur autarken Versorgung der installierten Messtechnik ausgestattet (Abbildung 25). Im Gegensatz zum Golf mussten für den Einbau der Messtechnik dazu im Motorraum zum Teil einige große Veränderungen sowie Verlagerungen von Bauteilen durchgeführt werden. Da der BMW nicht standardmäßig mit einer Anhängerkupplung erhältlich ist, musste diese für die Adaption des PEMS nachgerüstet und in den Zulassungspapieren eingetragen werden.

In der Abbildung 23 ist der Motorraum des BMW abgebildet. Im Gegensatz zum Golf GTE ist hier nicht zu erkennen, dass es sich bei diesem Fahrzeug um einen Hybrid handelt. Die einsehbaren Einbauten entsprechen denen eines konventionellen Verbrennerfahrzeuges. Leistungselektronik und Hochvoltinstallationen sind auf dem ersten Blick nicht ersichtlich.

Auch beim BMW 330e wurden die Hin- und Rückflussleitungen der Kraftstoffversorgung aufgetrennt, mit Kupplungen versehen und über Leitungsverlängerungen ein Kraftstoffsensor und die dazugehörige Signalauswertung (Abbildung 23: blaue Kiste oben links) integriert. Die zusätzlich verlegten Kraftstoffleitungen und der verlegte Kraftstofffilter mussten in Motornähe geführt werden und wurden, um übermäßige Erwärmung des Kraftstoffs zu vermeiden, zusätzlich mit Isolationsmaterial umwickelt (Abbildung 23; Mitte links).



Abbildung 23: Motorraum des BMW mit eingebautem Kraftstoffdurchflusssensor

Beim BMW 330e sind die wesentlichen Komponenten des elektrischen Hybridsystems im Unterboden verbaut. Diese sind nach Abnahme der Unterbodenverkleidung einsehbar (s. Abbildung 24 mit der Hochvoltbatterie und den dazugehörigen Hochvoltkomponenten/-verkabelung). Die Hochvoltbatterie ist direkt neben dem Endschalldämpfer unter dem Kofferraum (im Bild oben) verbaut. Von dort aus verlaufen die hochspannungsführenden Kabel zum Charger, welcher sich mittig unter dem Fahrzeug befindet, und weiter zur Leistungselektronik. Von dieser ausgehend werden dann die E-Maschine, der Klimakompressor und der PTC-Heizer elektrisch versorgt.



Abbildung 24: Unterboden des BMW mit den von der Batterie zur Leistungselektronik geführten Hochvoltkabeln (orange)

Vor den Messfahrten wurden alle Messsensoren auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft, parametrisiert und getestet. Abbildung 25 zeigt das installierte Messdatenerfassungssystem im BMW 330e mit der integrierten Messtechnikversorgung bei der Erstinbetriebnahme nach dem Umbau.



Abbildung 25: Inbetriebnahme des Messtechnik- und Versorgungsrack im BMW

5.2.3 Mercedes C350e

Als drittes Fahrzeug wurde der Mercedes C350e nach Beschaffung der erforderlichen Herstellerpläne (s.o.) analog zum Golf und BMW umgebaut, mit Messsensoren ausgestattet und mit einem Messtechnik- sowie einem Versorgungsrack versehen. Für die doppelläufigen Endrohre des Mercedes musste zum Anschluss und Aufnahme des Volumenstrommessers und der PEMS eine Spezialkonstruktion gefertigt und geschweißt werden. Diese ist in Abbildung 26 abgebildet.



Abbildung 26: Doppelrohr-PEMS-Abgasadaption am Mercedes C350e

Beim Mercedes C350e befindet sich die Hochvoltbatterie unter der Kofferraumabdeckung. Die Ladesteckdose und der On-Board-Lader sind ebenfalls am Heck und somit in direkter Nähe zur Batterie untergebracht. Wie die anderen beiden Fahrzeuge auch, verfügt auch der Mercedes C350e über einen Hochvolt-PTC-Heizer und einen elektrischen Klimakompressor. Diese sowie die Versorgung des 12V-Systems erfolgen aus dem Hochvoltsystem, sodass die Lichtmaschine entfällt. Auch hier wurden entsprechende Strom- und Spannungsmesssensoren installiert, um elektrische Traktionsenergie und den Bedarf der Nebenverbraucher separat zu erfassen.

Die Abbildung 27 zeigt den Motorraum des Fahrzeugs. Wie auch beim BMW 330e entspricht dieser im wesentlichen dem des reinen Verbrennermodells. Im Gegensatz zum Golf GTE befinden sich, ebenso wie beim BMW, keine Hochvoltkomponenten bzw. Hochvoltleitungen (diese sind an der orangenen Farbe leicht zu identifizieren) im Motorraum. Im Speziellen ist der Abbildung 27 zu entnehmen, dass das Packaging des Mercedes C350e besonders wenig Raum bietet, um weitere Einbauten und Messsensoren zu integrieren. Das bedeutet für die Messtechnikausstattung eine besondere Herausforderung und im Vergleich zu den anderen Fahrzeugen einen erhöhten Aufwand für die Integration. So wurde aus Mangel an Bauraum im Motorraum z.B. der Kraftstoffdurchflusssensor bei diesem Fahrzeug im Unterboden verbaut.



Abbildung 27: Motorraum Mercedes C350e

Die Abbildung 28 zeigt den umgebauten Mercedes C350e mit Messtechnik- und Versorgungsrack, die im Kofferraum eingebaut wurden, sowie die Spezialkonstruktion zur Zusammenführung der Abgase mit dem Volumenstrommesser und angebautem PEMS-System.



Abbildung 28: Mercedes C350e mit Messtechnik und PEMS

Mit den so ausgestatteten Fahrzeugen wurden die in Abschnitt 2.3 und Abschnitt 2.4 beschriebenen RDE-Tests auf der Straße sowie die WLTC (2.2) und NEFZ (2.1) Fahrprofile am Rollenprüfstand (4.5) durchgeführt (hier noch zusätzlich mit paralleler Abgasmessung über das MEXA-System) sowie die Messergebnisse ausgewertet und abgeglichen (s. §7).

6 Messprogramm

Aus der Zielsetzung des Projekts, die Energieverbräuche und Emissionen von Realfahrten und Prüfstandsfahrten gegenüber zu stellen, ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten und Kombinationen der verschiedenen Testparameter. Da mit den im Projekt zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht alle Variationen abgedeckt werden können, wurde eine Auswahl an variierenden Parametern getroffen. Dies betrifft in erster Linie den Fahrmodus der Fahrzeuge. Da die Fahrzeuge verschiedene Modi anbieten, die sich in ihrer Betriebsstrategie hinsichtlich der Nutzung von E-Motor und Verbrennungsmotor unterscheiden, und zudem damit kombinierbare Fahrdynamikeinstellungen bieten, wurde für die Tests eine Auswahl dieser Einstellungen getroffen. Dies ist zum einen notwendig, um normkonforme und reproduzierbare Messungen durchzuführen. Zum anderen kann somit eine einheitliche Vorgehensweise bei den Tests gewährleistet werden, auch wenn jedes Fahrzeug unterschiedliche Betriebsmodi aufweist und sich die Fahrzeuge ggf. in den standardmäßig eingestellten Modi unterscheiden. Die sich bei den drei Fahrzeugen ähnelnden Fahrmodi werden zur besseren Vergleichbarkeit wie folgt bezeichnet:

- Eco-max: Maximales elektrisches Fahren im elektrischen-Modus mit 100% SOC¹³ der Batterie zu Beginn der Messfahrt (Modus mit höchstem elektrischen Energieverbrauch)
- Comfort-hybrid, Hybrid-Modus mit 100% SOC der Batterie zu Beginn der Fahrt
- Comfort-hybrid, Hybrid Modus mit 0% SOC der Batterie zu Beginn der Fahrt
- Sport-Modus mit 0% SOC der Batterie zu Beginn der Fahrt (Modus mit höchster Dynamik und dem höchsten Kraftstoffverbrauch)

Ebenso wurden die Anzahl der zu fahrenden Zyklen und die betrachteten Temperaturbereiche eingeschränkt, da dies entscheidenden Einfluss auf den Zeitaufwand für das geplante Messprogramm hat. Für normkonforme Messungen auf dem Rollenprüfstand sind Temperaturen von 23°C notwendig, für repräsentative Labormessungen unter kalten Bedingungen sind -7°C üblich. Weitere Temperaturen können auf dem Prüfstand aufgrund der eingeschränkten zeitlichen Kapazitäten im Rahmen des Projektes nicht untersucht werden. Durch die zeitliche Verschiebung der RDE Messungen decken die Temperaturen einen Temperaturbereich von ca. 5°C bis 28°C ab. Bezüglich der Verwendung von Nebenverbrauchern, wie z.B. Klimaanlage, wurde für die RDE Messungen davon ausgegangen, dass die Klimaanlage eingeschaltet und auf 22°C eingestellt ist, da dies dem angenommenen normalen Verhalten des Nutzers entspricht. Bei den Normzyklen sind die Nebenverbraucher im Gegensatz dazu ausgeschaltet, wie es entsprechend in den Normen vorgesehen ist, um die Vergleichbarkeit mit Messungen von verschiedenen Fahrzeugen untereinander und denen anderer Einrichtungen zu gewährleisten. In den folgenden Grafiken sind die Geschwindigkeitsprofile der Normfahrzyklen und ihre jeweiligen Strecken dargestellt. Im Vergleich dazu ist im nachfolgenden Bild das Geschwindigkeitsprofil einer ausgewählten RDE-Fahrt veranschaulicht.

¹³ State of Charge/Batterieladezustand

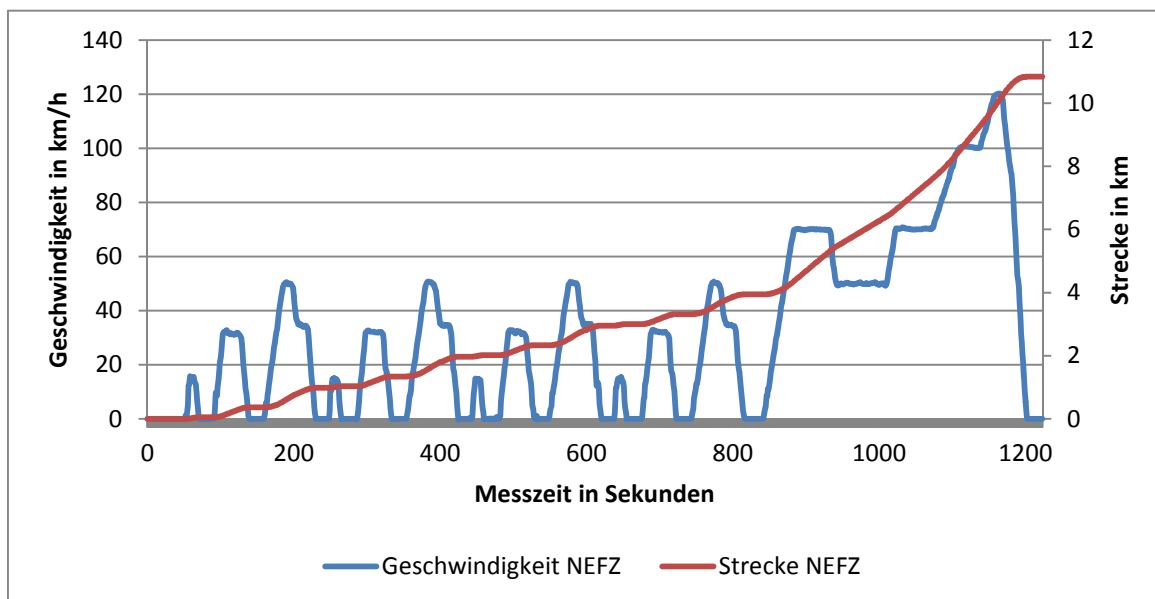


Abbildung 29: Neuer Europäischer Fahrzyklus

Das Abfahren eines NEFZ dauert 20 Minuten und findet zwischen 20°C und 30°C statt. Während der Tests müssen alle Nebenverbraucher im Fahrzeug ausgeschaltet sein. Beim NEFZ werden 4-mal der städtische Anteil und einmal der außerstädtische Anteil abgefahren. Die Strecke eines gesamt Zyklus beträgt je nach Ausnutzung des Toleranzbandes etwa 10,8 km.

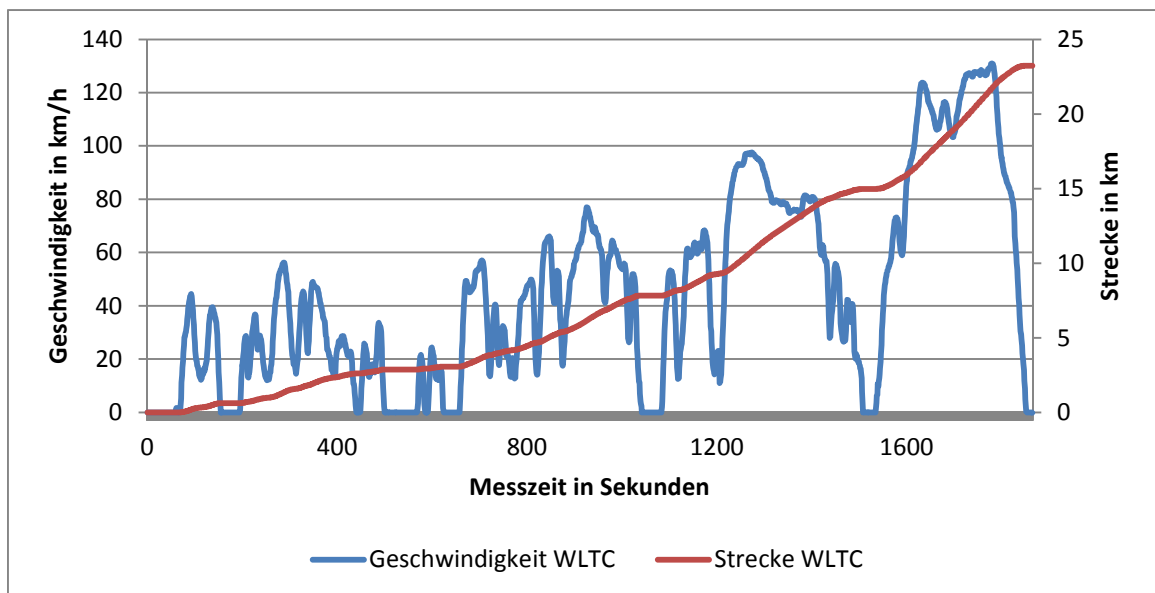


Abbildung 30: Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle

Der WLTC, welcher ab 2018 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge gilt, dauert 30 Minuten und findet bei 23°C statt. Er ist etwa 23 km lang und setzt sich aus 4 Abschnitten zusammen. Um die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen gewährleisten zu können, sind auch hierbei alle Nebenverbraucher ausgeschaltet.

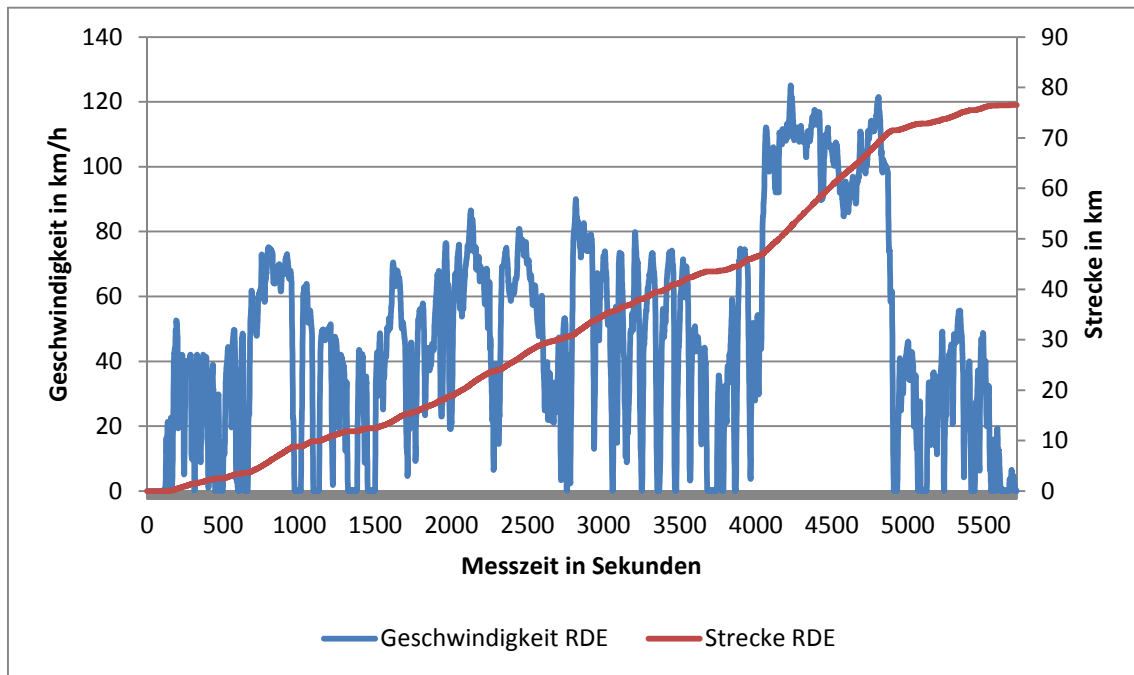


Abbildung 31: Beispielhaftes Geschwindigkeitsprofil einer DLR RDE-Strecke

Wie zu erkennen ist, ist das Fahrprofil der RDE-Strecke nicht nur zeitlich deutlich länger, sondern auch bei weitem dynamischer als die Geschwindigkeitsprofile der Normzyklen. Deutlich zu erkennen im RDE-Profil ist außerdem der gefahrene Autobahnanteil mit einer Geschwindigkeit zwischen 100-120 km/h. Die Strecke des ausgewählten RDE-Zyklus beträgt etwa 78 km und setzt sich aus städtischen, ländlichen und den Autobahnanteil zusammen. Die Fahrzeit beträgt durchschnittlich 95 Minuten.

Mit jedem Fahrzeug wurden die in Tabelle 19 aufgeführten Messungen durchgeführt. Die Messungen werden teilweise wiederholt, da insbesondere die RDE Messungen trotz eingehaltener RDE Normen eine gewisse Spannbreite an Fahrsituationen aufweisen können. Die Normzyklen NEFZ und WLTC werden jeweils mit vollgeladener Batterie gestartet und so lange wiederholt, bis ein vollständiger Zyklus mit niedrigstem SOC durchfahren worden ist. Die folgenden Tabellen zeigen eine Übersicht über die durchgeführten Tests. Ein WLTC- bzw. NEDC-Test besteht dabei stets aus mehreren durchfahrenen Zyklen, während ein RDE-Test bedeutet, dass die RDE-Strecke einmal durchfahren worden ist.

Tabelle 19: Übersicht über die durchgeführten Messungen je Fahrzeug

Zyklus	Temperatur	Betriebsmodus	Ort
NEFZ	23°C	Normkonform (rein elektrisch, nur Verbrenner)	Rollenprüfstand DLR
NEFZ	-7°C	Normkonform (rein elektrisch, nur Verbrenner)	Rollenprüfstand DLR
WLTC	23°C	Normkonform (rein elektrisch, nur Verbrenner)	Rollenprüfstand DLR
WLTC	-7°C	Normkonform (rein elektrisch, nur Verbrenner)	Rollenprüfstand DLR
2 x 4 RDE	verschiedene Bedingungen	ausgewählte Fahrmodi	On-Road mit PEMS und Rollenprüfstand DLR mit MEXA

Tabelle 20: Übersicht aller durchgeführten Tests

	Fahrzeug	Zyklus	Fahrmodus	Batterie SOC	Anzahl Tests
1	BMW 330e	RDE	Eco-max	100%	1
2	BMW 330e	RDE	Eco-max	100%	1
3	BMW 330e	RDE	Comfort-hybrid	0%	1
4	BMW 330e	RDE	Sport-hybrid	0%	1
5	BMW 330e	RDE	Comfort-hybrid	100%	1
6	BMW 330e	RDE	Comfort-hybrid	100%	1
7	BMW 330e	WLTC 23°	Eco-max	100 bis 0%	3
8	BMW 330e	NEFZ 23°	Eco-max	100 bis 0%	4
9	BMW 330e	RDE Prüfstand	Sport-hybrid	0%	1
10	BMW 330e	WLTC -7°	Eco-max	100 bis 0%	3
11	BMW 330e	NEFZ 23°	Eco-max	100 bis 0%	4
12	BMW 330e	WLTC -7°	Eco-max	100 bis 0%	3
13	VW Golf GTE	RDE	Eco-max	100%	1
14	VW Golf GTE	RDE	Comfort-hybrid	100%	1
15	VW Golf GTE	RDE	Comfort-hybrid	0%	1
16	VW Golf GTE	RDE	Sport-hybrid	0%	1
17	VW Golf GTE	RDE	Sport-hybrid	100%	1
18	VW Golf GTE	RDE	Eco-max	100%	1
19	VW Golf GTE	RDE	Eco-max	100%	1
20	VW Golf GTE	RDE	Comfort-hybrid	0%	1
21	VW Golf GTE	RDE	Sport-hybrid	0%	1
22	VW Golf GTE	NEFZ 23°	Eco-max	100 bis 0%	6
23	VW Golf GTE	NEFZ -7°	Eco-max	100 bis 0%	5
24	VW Golf GTE	WLTC 23°	Eco-max	100 bis 0%	3
25	VW Golf GTE	WLTC -7°	Eco-max	100 bis 0%	3
26	VW Golf GTE	RDE Prüfstand	Eco-max	100 bis 0%	1
27	Merc. C350e	NEFZ 23°C	Eco-max	100 bis 0%	3
28	Merc. C350e	WLTC 23°	Eco-max	100 bis 0%	3
29	Merc. C350e	RDE Prüfstand	Eco-max	100%	1
30	Merc. C350e	WLTC -7°	Eco-max	100 bis 0%	2
31	Merc. C350e	NEFZ -7°	Eco-max	100 bis 0%	3
32	Merc. C350e	NEFZ 23°C	Eco-max	100 bis 0%	3
33	Merc. C350e	RDE	Eco-max	100%	1
34	Merc. C350e	RDE	Eco-max	100%	1
35	Merc. C350e	RDE	eco hybrid	100%	1
36	Merc. C350e	RDE	eco hybrid	0%	1
37	Merc. C350e	RDE	Sport hybrid	0%	1
38	Merc. C350e	RDE	Eco-max	100%	1
37	Merc. C350e	RDE	eco hybrid	100%	1
38	Merc. C350e	RDE	eco hybrid	0%	1

7 Ergebnisse der Emissions- und Verbrauchsmessungen

7.1 Ergebnisse der Emissionsmessungen unter verschiedenen Bedingungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Die Ergebnisse werden zunächst für die Emissionen der Realfahrten bezogen auf die einzelnen Fahrzeuge dargestellt (Kap. 7.1.1), danach in gleicher Weise für die WLTC-Tests bei +23°C und -7°C (Kap. 7.1.2). Abschließend erfolgt ein Vergleich dieser Messungen anhand der durchschnittlichen Emissionen für die Fahrsituationen „innerorts“, „außerorts“ und „Autobahn“ (Kap. 7.1.3).

7.1.1 Emissionen im realen Betrieb

VW Golf GTE

Die einzelnen Messungen der Realfahrten werden hinsichtlich ihres Emissionsprofils ausgewertet. In Abbildung 32 links ist eine RDE-Messung mit Start – SOC = 100% und dem Fahrmodus E-Mode dargestellt. Die rechte Seite zeigt eine RDE-Messung mit Start – SOC = 0% und dem Fahrmodus Hybrid. Die ersten vier Abbildungen zeigen die Emissionen CO₂, CO, NO_x sowie die Partikelanzahl. Es sind sowohl die aktuellen Emissionen in mg/s als auch die kumulierten Emissionen in mg/km dargestellt. Die fünfte Abbildung zeigt die Katalysatortemperatur und die Umgebungstemperatur. In Abbildung sechs sind die Daten des Verbrennungsmotors, Drehzahl und Beschleunigung aufgetragen. Im untersten Diagramm sind weiterhin die Luftfeuchtigkeit sowie die aktuelle Höhe aufgetragen. Über das Höhenprofil lässt sich bei diesen Tests sehr gut die gefahrene Strecke verifizieren. Der VW Golf GTE schafft es bei vollgeladener Batterie, die RDE-Messung bis ca. zur Hälfte rein elektrisch zurückzulegen. Das ist deutlich mehr als bei den anderen beiden Fahrzeugen. Dies liegt vor allem an der größeren Batteriekapazität, aber auch am geringeren Leergewicht (vgl. Tabelle 5). Die CO₂-Emissionen nehmen nach Start des Verbrennungsmotors kontinuierlich zu. In Abschnitten mit hohen Geschwindigkeiten wird mehr Kraftstoff verbrannt und somit steigt auch hier die CO₂ Entstehung überproportional an. Solange das Fahrzeug rein elektrisch fährt, die Drehzahl also null ist, werden folgerichtig keine Emissionen erzeugt. Da keine Verbrennung im Motor stattfindet, bleibt auch der Abgasstrang und somit der Katalysator kalt. Startet nun der Verbrennungsmotor, da der SOC-Wert der Batterie unter einen Schwellwert gesunken ist, treffen die Rohemissionen auf einen kalten Katalysator. Bei geringen Temperaturen im Katalysator können die chemischen Reaktionen nicht optimal stattfinden und somit ist der Umsatz sehr gering. Dies hat zur Folge, dass die ausgestoßenen Emissionen stark ansteigen. Bezüglich der CO₂-Emissionen ist ersichtlich, dass diese durch die verschiedenen Ladestände der Batterie im linken Test mehr als doppelt so hoch sind wie in im rechten Test. Dies liegt vor allem am Ladezustand der Batterie bei Teststart. Der Streckenabschnitt, der mit dem Verbrennungsmotor gefahren wird, weist eher hohe Geschwindigkeiten auf. Deshalb ist hier der Kraftstoffverbrauch höher und die CO₂-Emissionen nehmen stark zu. Bei den CO-Emissionen zeigt sich, dass bei Start des Verbrennungsmotors der Katalysator entsprechend kalt ist. Findet dieser Start bei hohen Geschwindigkeiten statt, so steigen die CO-Emissionen überproportional an. Aus diesem Grund liegen die CO-Emissionen bei ca. 210 mg/km. Dies ist im Vergleich zu der zweiten hier dargestellten Messung sehr hoch (CO = 80 mg/km).

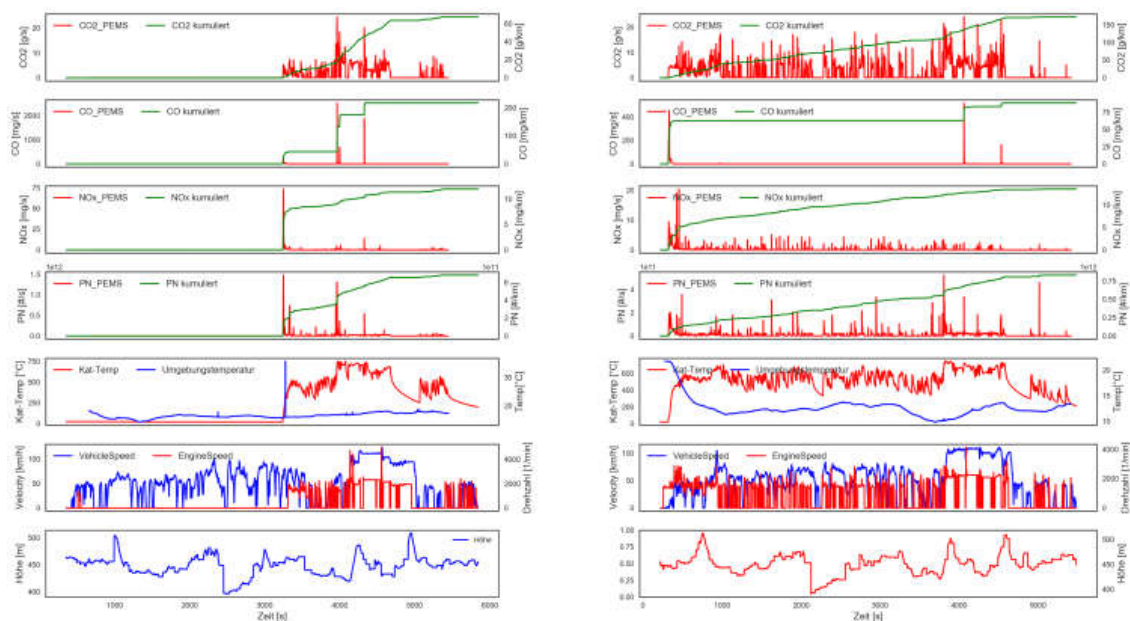


Abbildung 32: CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen von zwei beispielhaften RDE Tests des VW Golf GTE; links: SOC = 100% bei Teststart; Fahrmodus: Eco-Mode; rechts: SOC = 0% bei Teststart; Fahrmodus: Hybrid (zur besseren Lesbarkeit siehe die Abbildungen im Anhang A)

In Abbildung 33 sind die RDE-Messungen des VW Golf GTE dargestellt. Dabei wird zwischen den verschiedenen Fahrmodi und des Ladezustands der Batterie unterschieden. Die grünen und roten Kurven sind Messungen, bei der die Batterie bei Teststart vollgeladen war. Bei den blauen und der lila Kurve handelt es sich um Messungen mit Start – SOC = 0%. Zudem wird noch zwischen den einzelnen Fahrmodi unterschieden. Da die RDE-Fahrten im Geschwindigkeitsprofil nicht reproduzierbar sind, liegen die Kurven nicht übereinander. Vergleichbar sind die Messungen trotzdem, da am Anfang der Tests eher geringe Geschwindigkeiten gefahren wurden und es einen Bereich auf der Autobahn mit hohen Geschwindigkeiten gibt. Die durch die Geschwindigkeit definierten drei Fahranteile sind zu unterscheiden. Die CO₂-Emissionen sind bei den Messungen mit voller Batterie bei Teststart geringer. Diese fallen geringer als zum Beispiel bei der C-Klasse aus. Dies ist durch die größere Batteriekapazität zu erklären. Durch die Hybridisierung mit der relativ großen Batterie kann mehr als die Hälfte der RDE-Fahrt rein elektrisch gefahren werden. Dies wirkt sich positiv auf die CO₂-Emissionen und somit auch auf den Kraftstoffverbrauch aus. Offensichtlich ist, dass der Test im Hybridmodus geringere CO₂-Emissionen aufweist als Test im GTE-Modus. Der GTE-Modus ist ein dynamischer Fahrmodus und vergleichbar mit dem Sport+ bei der C-Klasse und dem Sport-Modus des BMW 330e und führt zu höheren CO₂-Emissionen. Bei CO und NO_x sind die Emissionen auf einem niedrigen Niveau. Schaltet sich der Verbrennungsmotor nach dem rein elektrischen Fahren ein, steigen die CO- und NO_x-Emissionen überproportional an. Ebenfalls zu erkennen ist der stufenartige Anstieg der Emissionen. Bei den CO-Emissionen übersteigen die RDE-Messungen mit voller Batterie bei Teststart teilweise die mit leerer Batterie bei Teststart.

Vergleich der PEMS-Messungen

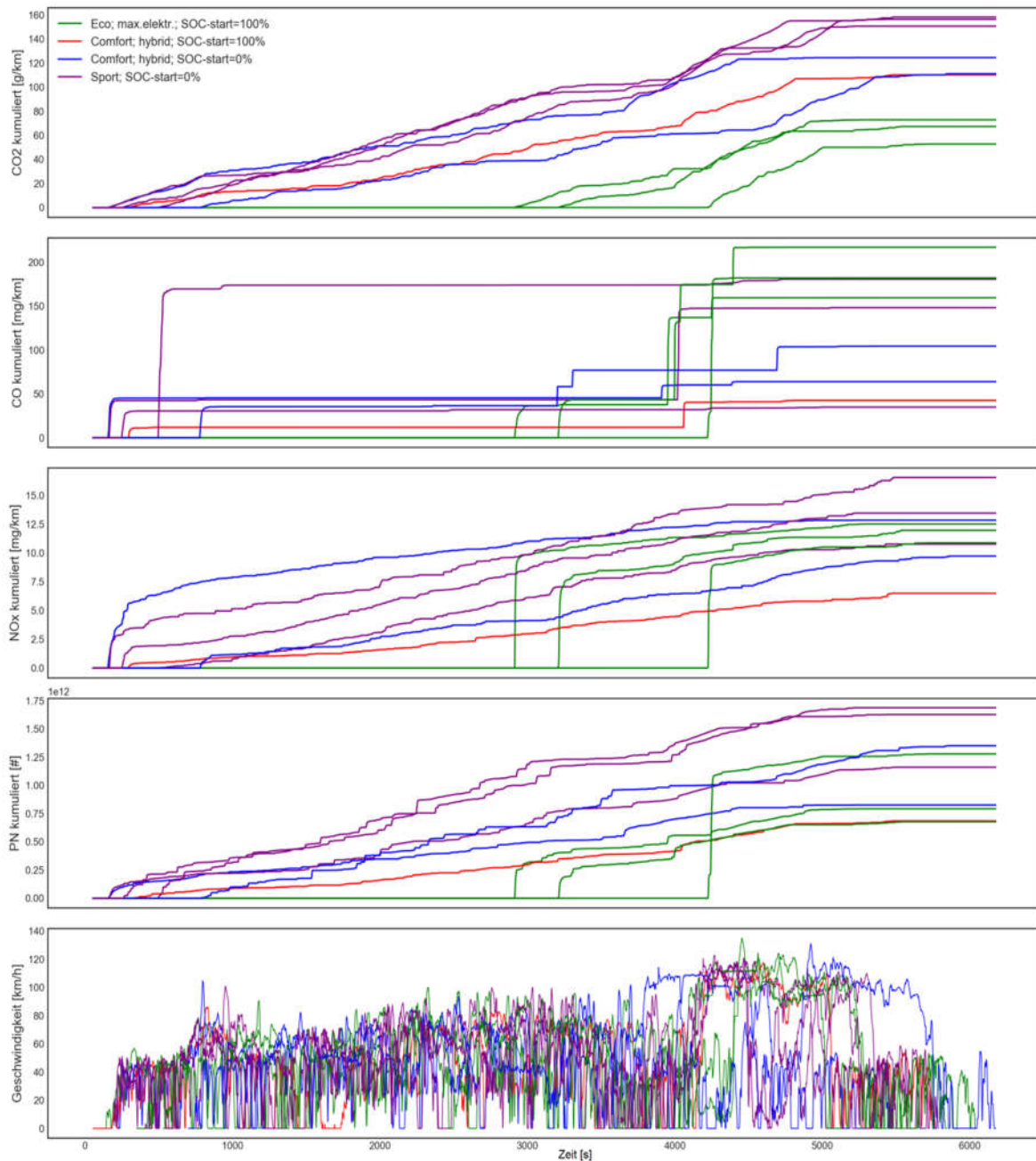


Abbildung 33: Kumulierte CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen sowie Geschwindigkeitsprofil für die RDE Messungen des Golf GTE

BMW 330e

Im Fall der RDE konformen Messungen des BMW 330e in den oben beschriebenen Fahrmodi (Abbildung 34) zeigen sich ähnliche Muster wie im Falle des VW Golf GTE. Die Fahrzeuggeschwindigkeit der RDE Fahrten auf exakt der gleichen Strecke hat zwar im Großen und Ganzen einen ähnlichen Verlauf, die Haltezeiten und fahrdynamischen Bedingungen weichen jedoch stark voneinander ab. Dennoch sind die Fahrzeuge mit den gleichen Fahrzeug-Modus-Einstellungen bezüglich der CO₂-Emissionen relativ gut reproduzierbar. Im Gegensatz zum VW Golf GTE ist beim BMW 330e der Unterschied zwischen den Fahrten mit maximalem elektrischen Anteil und dem Hybridmodus mit vollgeladener Batterie bezüglich der elektrisch gefahrenen Strecke und den CO₂-Emissionen kaum erkennbar. Sowohl die elektrischen Fahranteile als auch die absoluten CO₂-Emissionen verlaufen nahezu gleich. Ebenso sind die CO₂-Emissionen des Hybridmodus mit 0 % SOC nur um ca. 20 g CO₂/km höher als die Emissionen des Modus mit 100 % SOC zu Testbeginn, da ein beträchtlicher Teil der zweiten Streckenhälfte elektrisch zurückgelegt wird. Auf der kompletten RDE Strecke wird bei dieser Messung somit der hohe Energiebedarf und die damit einhergehenden hohen CO₂-Emissionen der ersten Streckenhälfte durch eine hohe Rekuperationsrate bei den inner- und außerorts Fahranteilen und einem hohen Anteil elektrischen Fahrens im Autobahnteil kompensiert.

Bei den RDE-Tests, die mit voller Batterie starten, liegen zwar die CO₂ Emissionen unter denen der Fahrten, die mit leerer Batterie gestartet wurde, jedoch zeigen die CO und Partikelemissionen einen deutlichen Anstieg durch wiederholten Motorkaltstart, der bei hoher Leistungsanforderung stattfindet, so dass die Gesamtemissionen in beiden RDE-Fahrten mit voller Batterie im Bereich der Fahrten mit weitaus niedrigerem elektrischen Fahranteil liegen. Die Messungen der anderen beiden Fahrzeuge zeigen ein ähnliches Verhalten, insbesondere was den sprunghaften Anstieg der Partikel, NO_x und CO Emissionen nach längeren elektrischen Fahrphasen angeht. Ebenso wie beim VW Golf GTE lässt sich somit feststellen, dass die Schadstoffemissionen im Gegensatz zu den CO₂-Emissionen nicht vom elektrischen Fahranteil der Testfahrten abhängen.

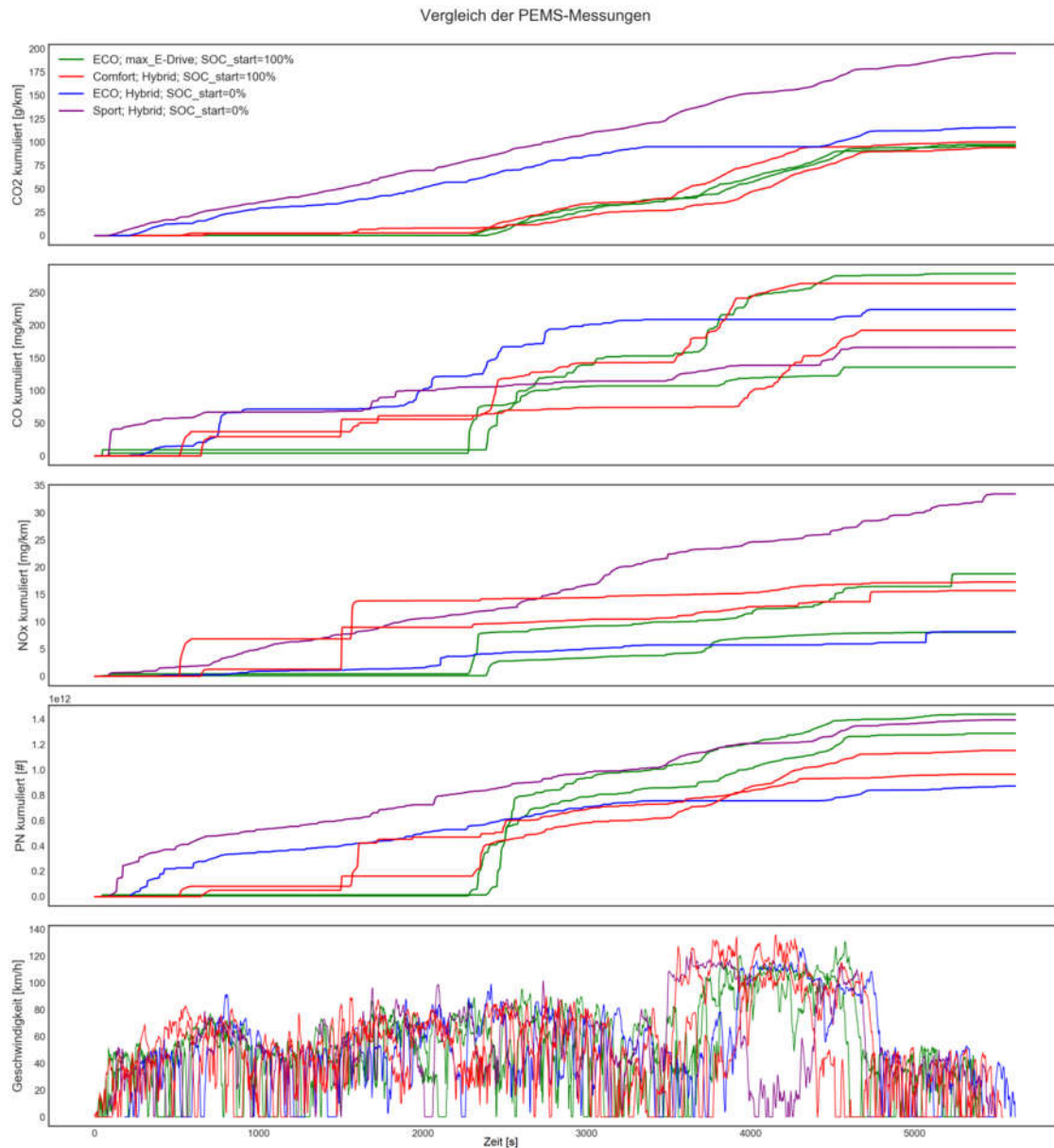


Abbildung 34: Kumulierte CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen sowie Geschwindigkeitsprofil für die RDE Messungen des BMW 330e¹⁴

¹⁴ Der NO₂-Anteil der NO_x-Emissionen weist aufgrund eines fehlerhaften Sensors bei den Messungen im Modus Comfort-hybrid-SOC100% eine positive Abweichung von 5 bis 10 % auf.

Mercedes C350e

Die RDE-Fahrten sind nach den genormten Randbedingungen für RDE-Tests durchgeführt worden. Abbildung 35 zeigt eine RDE-Messung bei der bei Teststart die Batterie vollgeladen war und der Fahrmodus Eco gewählt wurde. Die Wirkung des Motor- und Kaltstarts während des Fahrzeugbetriebs wird in Abbildung 35 links bei ca. 900 s und 2000 s deutlich dargestellt. Betrachtet man die CO-Emissionen, so wird bei 2000 s mehr als 50% der gesamten CO-Emissionen ausgestoßen. Im weiteren Verlauf der Messung steigen die CO-Emissionen nun kontinuierlich an, da der Katalysator seine Arbeitstemperatur erreicht hat. Vermutlich ist die Entstehung der CO-Emissionen auf einen Motorbetrieb mit leicht fetter Gemischbildung zurückzuführen. Auch die NO_x-Emissionen zeigen sehr markante Peaks beim Start des Verbrennungsmotors.

In Abbildung 35 rechts ist eine RDE-Messung mit einer leeren Batterie bei Teststart dargestellt. Als Fahrmodus wurde Sport (Daimler-Bezeichnung Sport+) gewählt. Die Reihenfolge der Darstellungen ist unverändert zur vorherigen Abbildung. Es ist zu erkennen, dass die CO₂-Emissionen deutlich erhöht sind. Dies liegt einerseits am gewählten Fahrmodus Sport+, andererseits findet die gesamte Fahrt mit eingeschaltetem Verbrennungsmotor statt. Durch die dynamischere Fahrweise im Sport-Modus, wird mehr Kraftstoff verbraucht und somit steigen die CO₂-Emissionen an. Zu erkennen ist auch, dass das Niveau der Drehzahl im Sport-Modus erhöht ist. Interessant sind in dieser Messung insbesondere die CO-Emissionen. Diese liegen unterhalb der oben beschriebenen Messung. Dies ist auf die geringe Motorlast bei Start des Verbrennungsmotors zurückzuführen. Der Verbrennungsmotor wird bei Teststart gestartet und somit ist die Last in diesem Bereich geringer als wenn der Verbrennungsmotor bei hoher Geschwindigkeit gestartet wird. Da die Katalysatortemperatur bei Teststart gering ist, misst das PEMS Messgerät eine relativ hohe CO-Konzentration. Die Katalysatortemperatur steigt nach Motorstart auf ~ 500°C an und somit wird auch der Umsatz im Katalysator erhöht. Den hohen Umsatz im Katalysator kann man vor allem bei den NO_x-Emissionen erkennen. Dort ist die Konzentration nach dem Erreichen der hohen Katalysatortemperatur sehr gering.

Bei den Partikelkonzentrationen der beiden Tests fällt auf, dass die Partikelemissionen beim Test im Sport-Modus nur halb so hoch sind. Die meisten Partikel werden nach Motorstart bei geringen Motortemperaturen emittiert. Ist die Last bzw. die Fahrzeuggeschwindigkeit bei Motorstart hoch, so werden viele Partikel ausgestoßen. Dies ist beim Test im ECO-Modus der Fall. Beim Test im Sport-Modus ist die Last bei Motorstart gering und somit werden auch nur wenige Partikel gebildet. Im Verlauf der weiteren Messung steigen die Partikelemissionen in beiden Tests gleichmäßig und nur gering an.

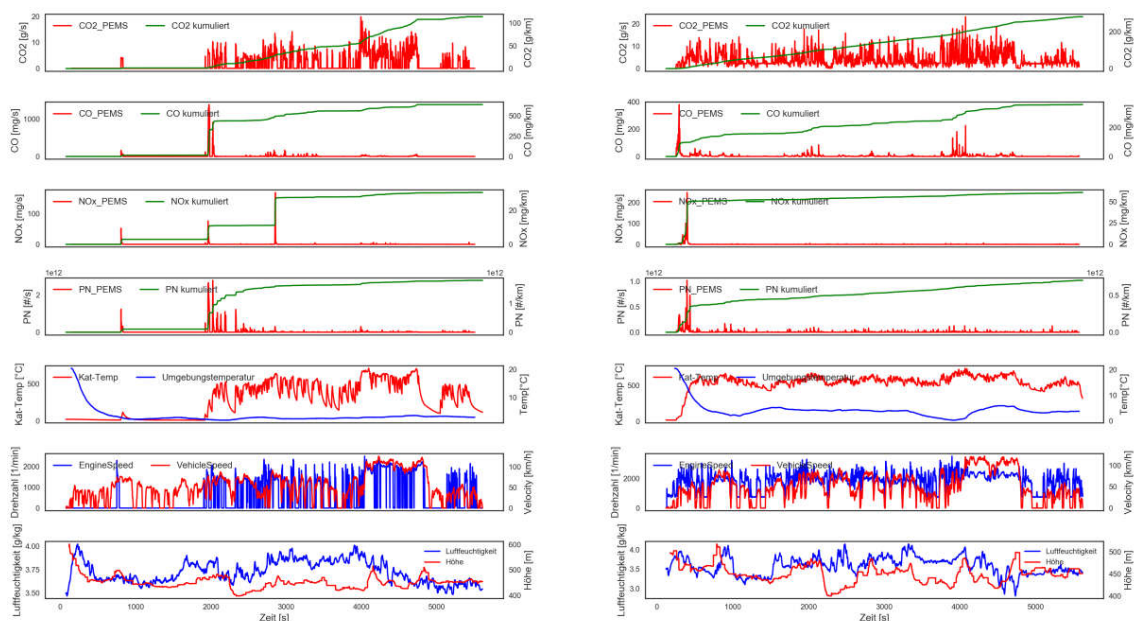


Abbildung 35: CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen von zwei beispielhaften RDE Tests des Mercedes C350e; links: SOC = 100% bei Teststart; Fahrmodus: Eco-Mode; rechts: SOC = 0% bei Teststart; Fahrmodus: Sport (zur besseren Lesbarkeit siehe die Abbildungen im Anhang B)

In Abbildung 36 sind die RDE-Messungen vergleichend dargestellt. Bei den Messungen mit Start – SOC = 100% ist im CO₂-Verlauf deutlich zu erkennen, dass zu Beginn der Messung rein elektrisch gefahren wurde. Der weitere CO₂-Verlauf der vier Messungen ist gut vergleichbar. Auffallend ist insbesondere der Endwert der ausgestoßenen CO₂-Emissionen. Dieser liegt bei allen Messungen mit vollgeladener Batterie bei Teststart in etwa bei 100 g/km. Die Hybridisierung des Fahrzeugs ist in Bezug auf die CO₂-Emission und den Kraftstoffverbrauch somit positiv zu bewerten. Interessant ist zudem die Emission der Partikel. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Messung im Sport-Modus die geringsten Partikelemissionen aufweist. Bei Messungen mit Start – SOC = 100% nimmt die Partikelbildung bei Motorstart überproportional zu. Somit hat die Hybridisierung in Bezug auf den Partikelaustritt in den RDE-Tests keinen positiven Einfluss.

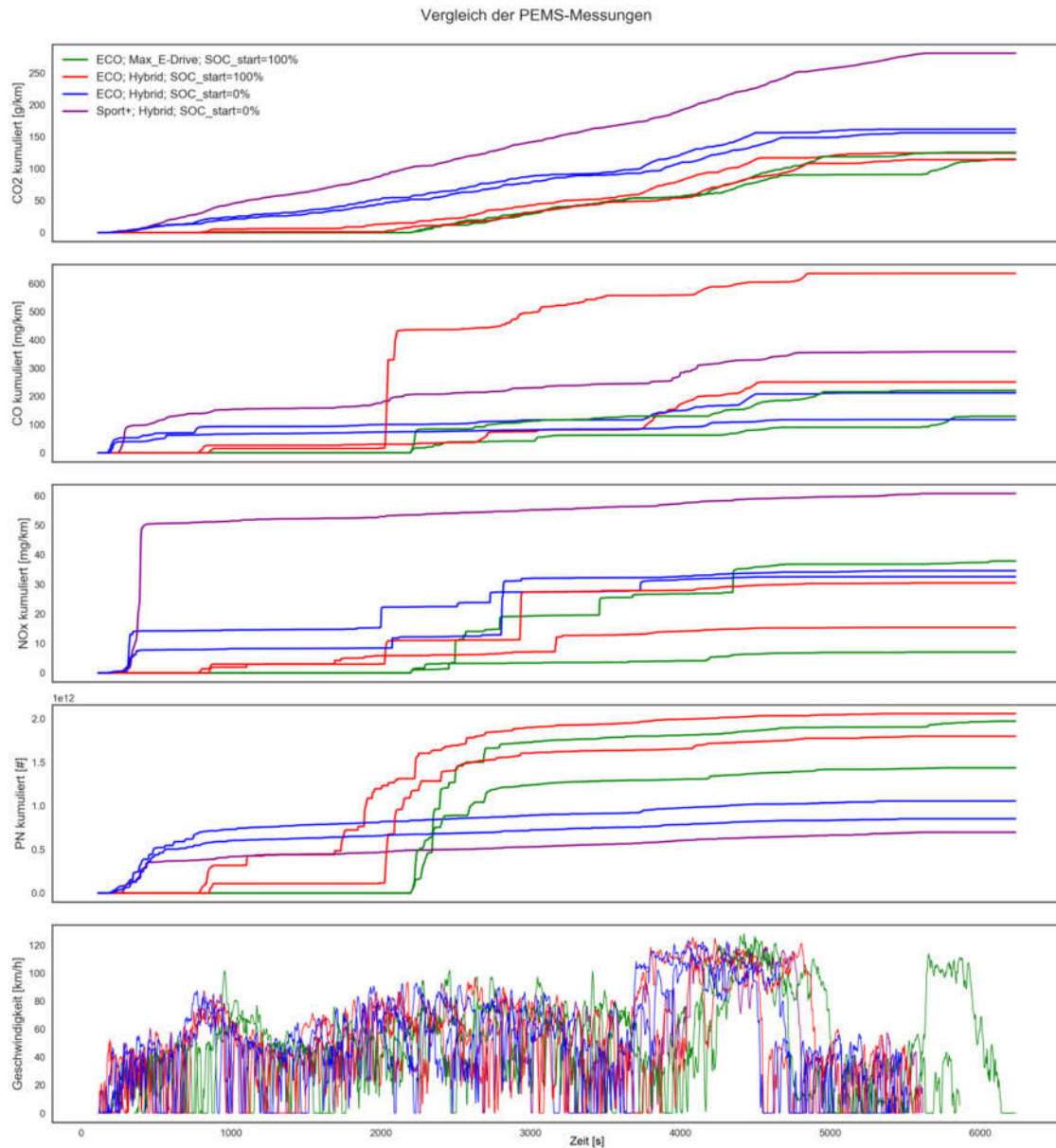


Abbildung 36: Kumulierte CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen sowie Geschwindigkeitsprofil für die RDE Messungen des Mercedes C350e

7.1.1 Emissionen im WLTC

Golf GTE

Zusätzlich zu den Realfahrten sind Messungen auf dem Rollenprüfstand im Standardzyklus WLTC durchgeführt worden (Abbildung 37). Die Messungen sind gut reproduzierbar, da die Verläufe der Geschwindigkeitsprofile stets gleich sind. Bei den ersten beiden WLTC-Fahrten wird weniger CO₂ ausgestoßen als beim letzten. Der erste Zyklus wird, bei den Temperaturen von 23°C und -7°C, komplett elektrisch gefahren. Dies ist insbesondere durch die vergleichsweise große Batterie möglich. Beim zweiten Zyklus der Messreihen emittiert das Fahrzeug bei der Umgebungstemperatur -7°C deutlich mehr CO₂ als dies bei einer Umgebungstemperatur von 23°C der Fall ist. Aufgrund der geringeren Temperatur startet der Verbrennungsmotor zu einem früheren Zeitpunkt und somit wird mehr CO₂ ausgestoßen. Interessant ist die Betrachtung der jeweiligen dritten Zyklen. Hierbei wird beim kälteren Zyklus weniger CO₂ produziert. Vermutlich liegt es daran, dass die Batterie beim Start einen höheren SOC-Wert hat und somit bei geringen Geschwindigkeiten häufiger elektrisch gefahren werden kann. Diese Vermutung wird durch die dargestellten Drehzahlverläufe gestützt. Die Drehzahl des Kalttests ist im Vergleich zum Warmtest häufiger und länger null. Wie in den vorherigen Absätzen bereits mehrfach beschrieben, steigen die Emissionen und Partikel extrem an, wenn der Motor in einem ungünstigen Streckenabschnitt des Zyklus startet. Dieses Problem lässt sich auch in Abbildung 38 beobachten. Beim zweiten kalten WLTC startet der Verbrennungsmotor nach ca. 1350 s. In diesem Abschnitt ist die Geschwindigkeit relativ hoch und so werden viele Rohemissionen produziert. Nach weiteren 200 s ist der Katalysator warm und es werden so gut wie keine NO_x-, CO- und Partikelemissionen mehr gemessen. Vermutlich würden die Emissionen niedriger ausfallen wenn der Motor nicht erst bei hohen Geschwindigkeiten gestartet wird. In dieser Abbildung ist auch sichtbar, wie gut der Katalysator die Emissionen umsetzt. Vor allem beim dritten kalten WLTC, bei dem von Anfang an der Verbrennungsmotor läuft und somit der Katalysator immer heiß ist, sind nur geringe NO_x-, CO- und Partikelemissionen zu beobachten.

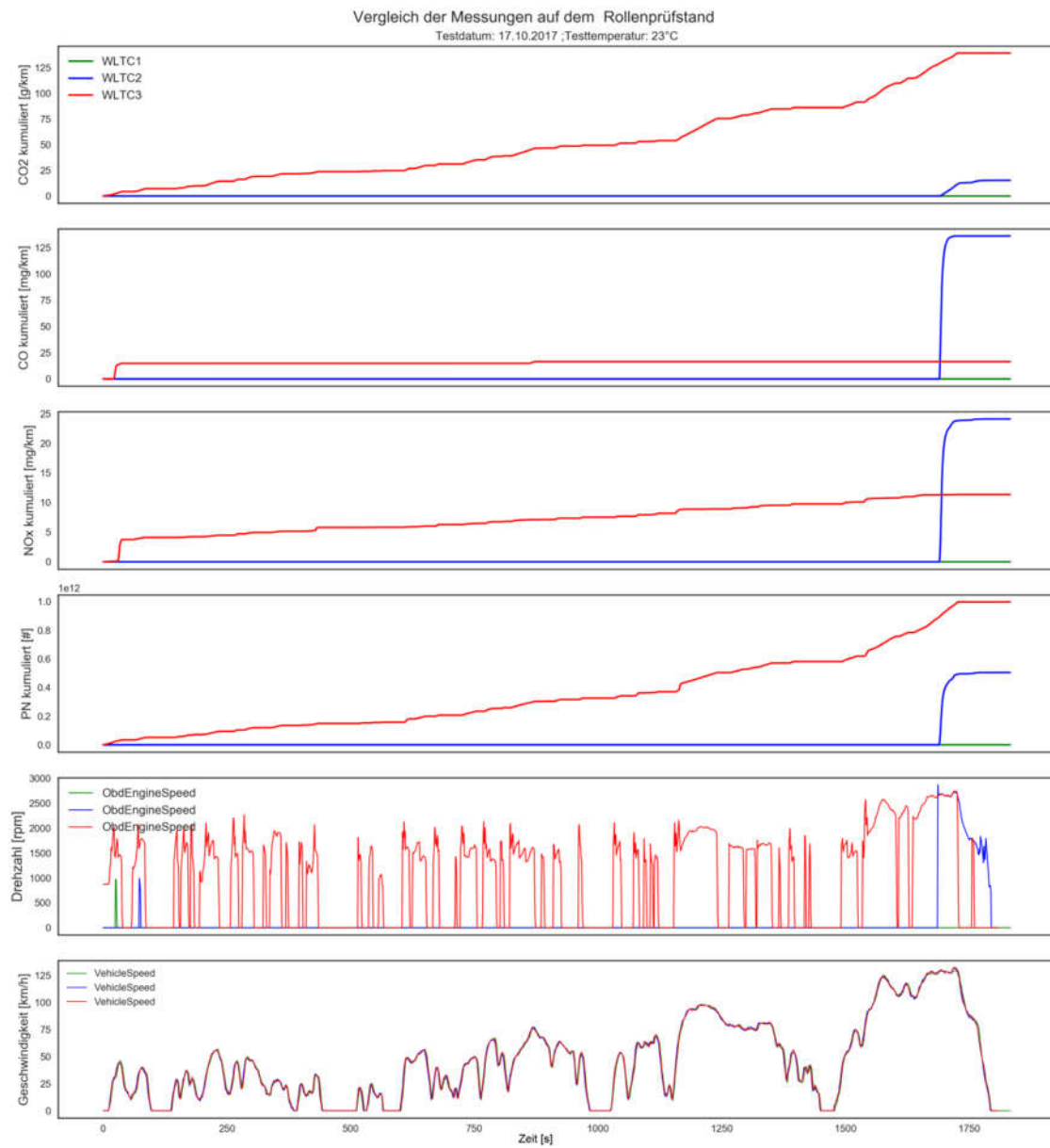


Abbildung 37: Kumulierte Emissionen der WLTC Tests des VW Golf GTE bei +23°C

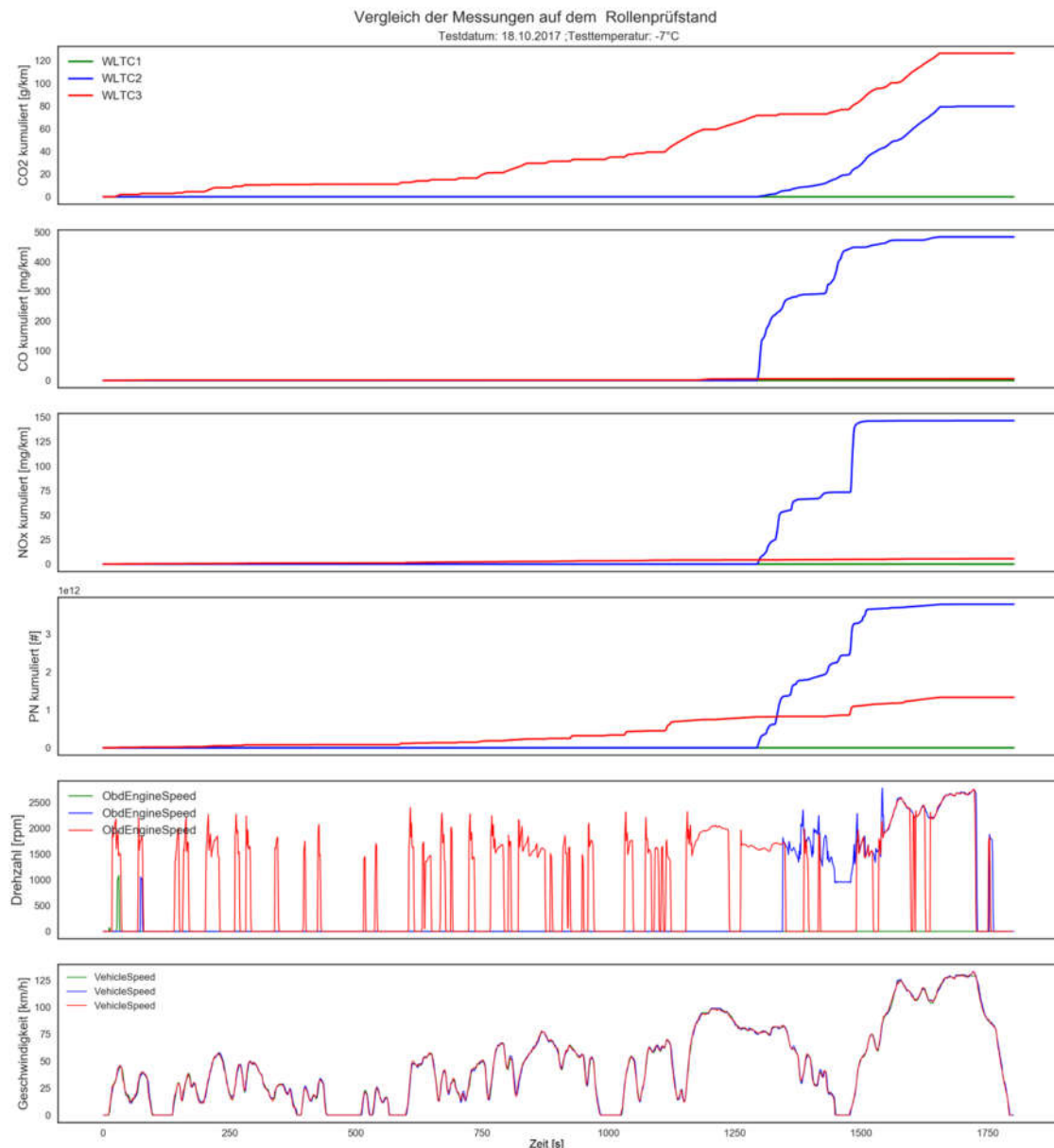


Abbildung 38: Kumulierte Emissionen der WLTC Tests des VW Golf GTE bei -7°C

BMW 330e

Das Vorgehen bei den WLTC-Tests des BMW 330e entspricht der bereits beschriebenen Prozedur des VW Golf GTE. Im Falle der Tests bei +23°C ist zu erkennen, dass sowohl der erste als auch der zweite WLTC größtenteils elektrisch durchfahren werden. Jedoch wird bereits im Autobahnteil des ersten Durchlaufs der Verbrennungsmotor gestartet. Die RDE Tests im Hybridmodus haben gezeigt, dass bei diesen Geschwindigkeiten auch längere Strecken rein elektrisch gefahren werden können. Im hier gewählten Eco-Modus startet der Verbrennungsmotor jedoch früher, was vermutlich einer dadurch höheren elektrischen Reichweite geschuldet ist. Ähnlich wie bei den RDE-Messungen sind die Emissionen an CO

und der Partikel bei den Zyklen mit hohem elektrischem Anteil nicht wesentlich geringer als im fast vollständig mit Verbrennungsmotor durchfahrenen dritten Zyklus.

Anders als beim VW Golf GTE startet der Verbrennungsmotor des BMW 330e im -7°C-Test bereits zu Beginn der Messung. Zwar werden kürzere Teile des WLTCs auch elektrisch durchfahren, jedoch ist erst im zweiten Durchlauf nach Aufwärmung der Batterie ein hoher Anteil elektrischen Fahrens zu beobachten. Im dritten Zyklus sind die CO₂-Emissionen deutlich höher als im Test bei moderaten Temperaturen. Noch stärker steigen die Schadstoffemissionen bei den -7°C-Tests an. Sowohl die CO- als auch die NO_x- und Partikelemissionen sind in etwa dreimal höher. Deutlich hervor treten hier die Kaltstartemissionen des ersten Zyklus, die für alle drei Schadstoffe zu Beginn des ersten Tests eine entscheidende Rolle für die Gesamtemissionen des WLTC-Durchlaufs spielen.

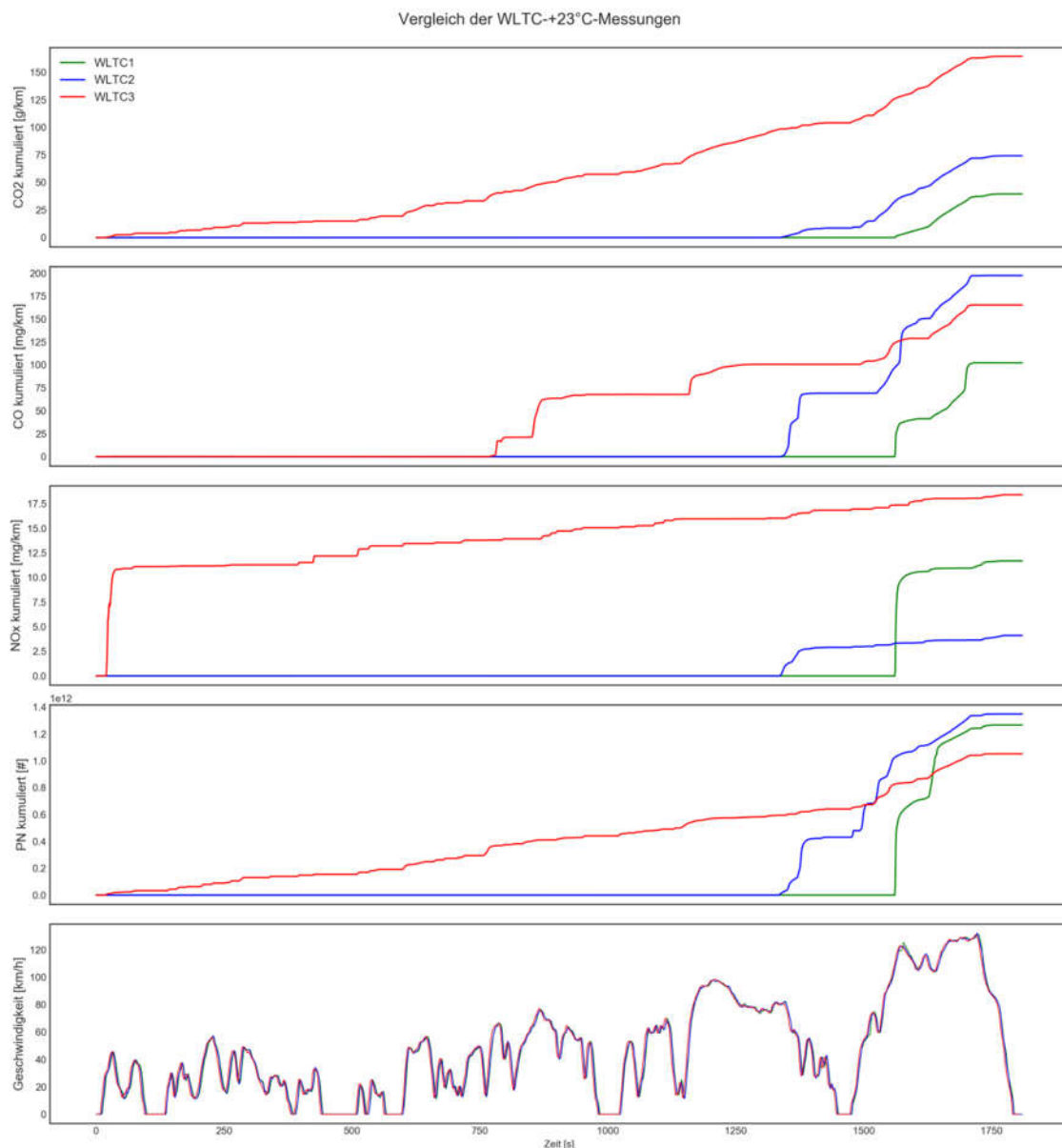


Abbildung 39: Kumulierte Emissionen der WLTC Tests des BMW 330e bei +23°C

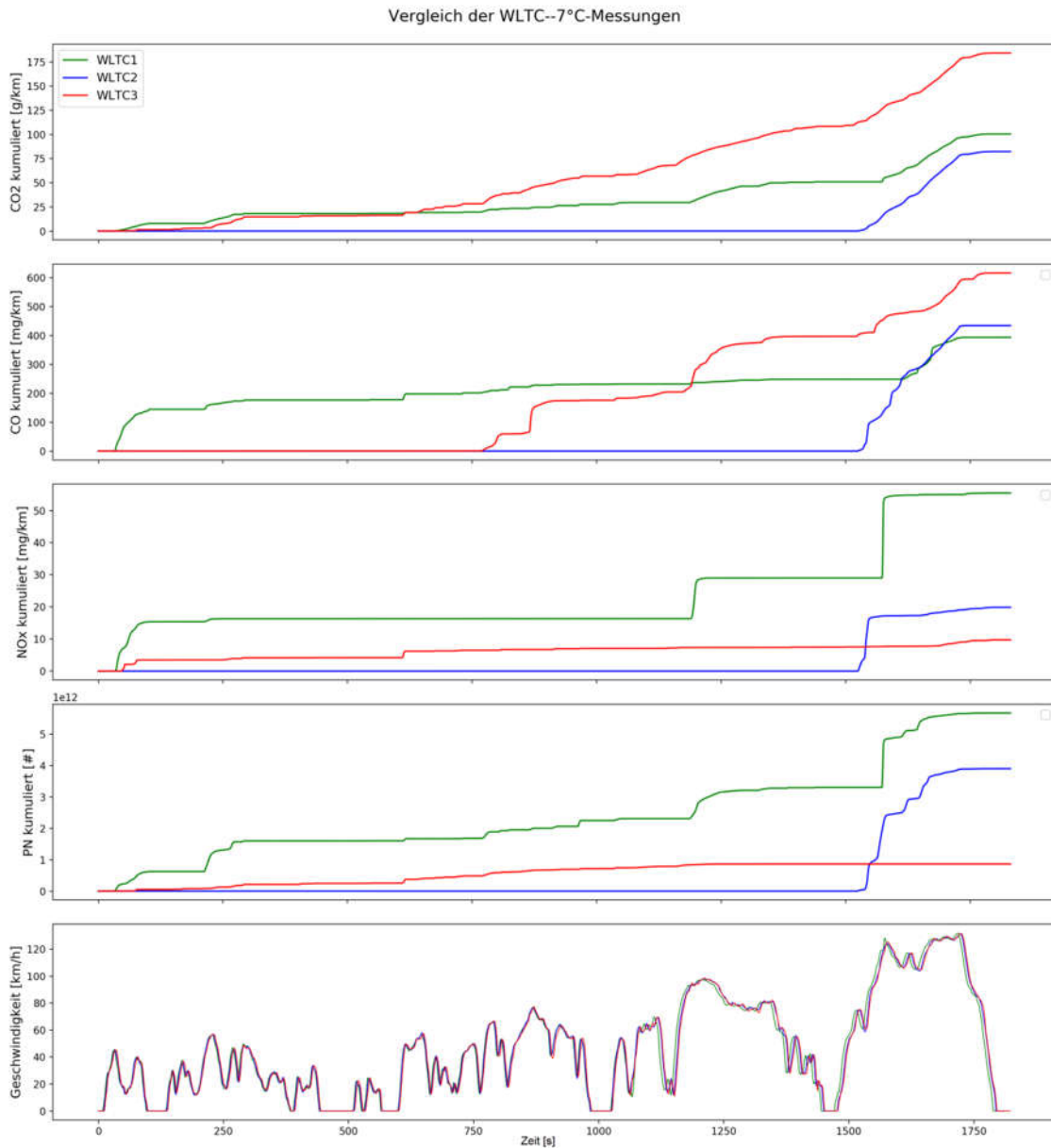


Abbildung 40: Kumulierte Emissionen der WLTC Tests des BMW 330e bei -7°C

Mercedes C350e

In Abbildung 41 sind die WLTC Messungen dargestellt. Die linke Seite sind die Messungen bei 23°C, die rechte Seite zeigt Zyklen bei -7°C Umgebungstemperatur. Wie oben bereits beschrieben ist die Batterie beim WLTC1 vollständig geladen. Der SOC-Wert der Batterie nimmt in der Folge der Messungen ab. Beim WLTC1 bei 23°C geht der Verbrennungsmotor lediglich zweimal an. Dies erklärt die geringen CO₂-Emissionen. Beim WLTC2 wird am Anfang des Tests rein elektrisch gefahren. Danach dann im Hybrid-Modus. Beim WLTC3 ist der Verbrennungsmotor von Anfang an aktiv. Auffällig ist, dass beim WLTC2 mehr CO₂ emittiert wird als beim WLTC3. Dies ist auf den Zeitabschnitt 1250 s – 1350 s zurückzuführen. In diesem Abschnitt ist der Verbrennungsmotor beim WLTC2 aktiv, beim WLTC3

fährt das Fahrzeug rein elektrisch. Da dies ein Bereich mit Geschwindigkeiten um die 75 km/h ist, steigen dort die CO₂-Emissionen stark an. Allgemein fallen die CO₂-Werte der Messung mit 23°C geringer aus als die der Messung mit -7°C.

Betrachtet man die NO_x-Emissionen wird auch hier wieder ersichtlich was beim Starten des Verbrennungsmotors bei hoher Last passiert. Der Katalysator ist kalt und beim Start des Verbrennungsmotors der Umsatz im Katalysator sehr gering. Beim WLTC1 bei 23°C schaltet sich der Verbrennungsmotor bei Geschwindigkeiten von ~120 km/h ein. Die NO_x-Emissionen sind entsprechend hoch und die bis dahin eingesparten NO_x-Emissionen werden bei weitem übertroffen. Dies kann man ebenso bei der Messung mit -7°C Umgebungstemperatur beobachten.

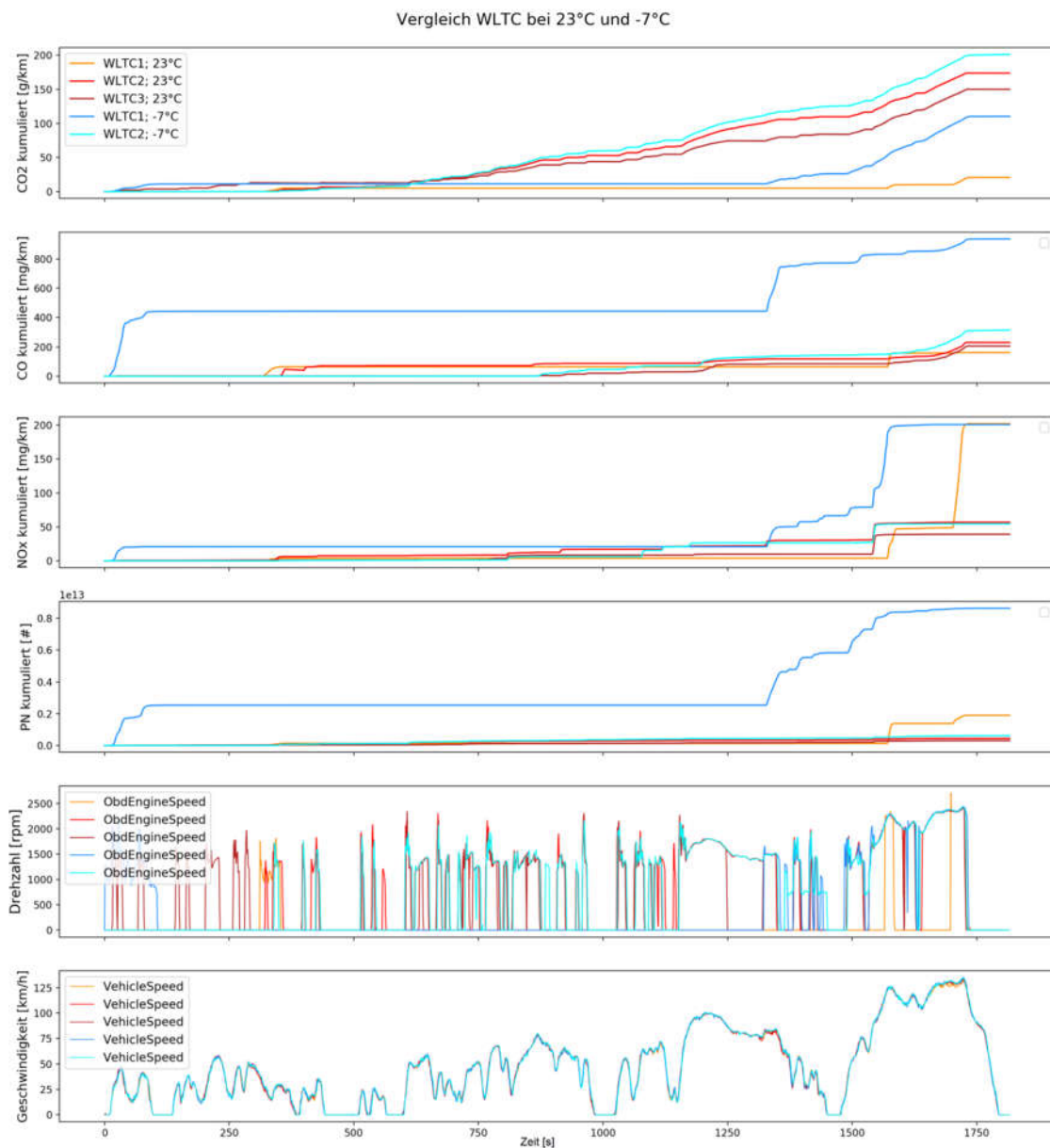
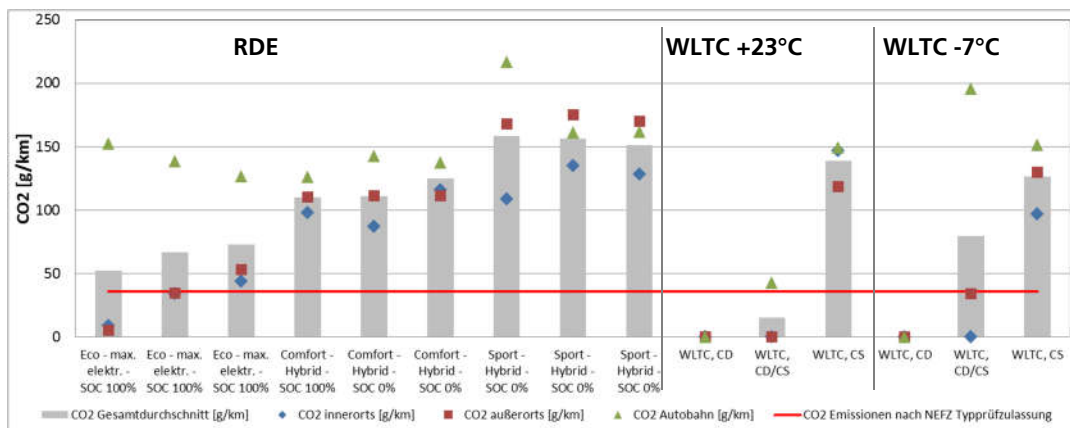


Abbildung 41: Kumulierte Emissionen der WLTC Tests bei +23°C und bei -7°C des Mercedes C350e

7.1.2 Vergleich der RDE-Messungen und der Prüfstandsmessungen

Golf GTE

Beim Vergleich der durchschnittlichen Emissionen der RDE-Tests mit denen der WLTC-Tests fällt auf, dass die Emissionen der RDE-Messungen unter den gegebenen Bedingungen zum Teil weit über den Werten der Typprüfzulassung liegen. Der offizielle NEFZ Zulassungswert beim VW Golf GTE beträgt 36 g/km. Dieser Wert wird bei jeder RDE-Messung überschritten. Die CO₂-Emissionen bei den Messungen auf dem Rollenprüfstand unterschreiten diesen Wert, falls die Batterie bei Teststart vollgeladen ist. Starken Einfluss auf die hohen Emissionen an CO₂ hat der Autobahnteil, in Abbildung 42 als grünes Dreieck dargestellt. Überwiegend bei den Tests mit voller Batterie bei Teststart, liegen die Werte zwar unter den Zielen des EU-Flottendurchschnitts, der Autobahnteil verschlechtert das Gesamtergebnis in Bezug auf CO₂ aber enorm. Bei den Normzyklen NEFZ (nicht dargestellt) und WLTC, wird bei Messungen die mit nicht vollgeladener Batterie stattgefunden haben, der ab 2021 gültige Flottenverbrauch zumeist überschritten. Aufgrund der hohen elektrischen Reichweite kann im jeweiligen ersten Zyklus, der Test komplett elektrisch und somit ohne lokale Emissionen gefahren werden. Die CO-Emissionsfaktoren sind im oberen rechten Bild dargestellt. Der CO-Grenzwert wird bei den meisten Messungen eingehalten. Lediglich ein NEFZ-Test bei der Umgebungstemperatur von -7°C überschreitet den Grenzwert deutlich, da der Verbrennungsmotor bei hohen Geschwindigkeiten gestartet wurde und somit viel CO gebildet wurde. Bezüglich der NO_x-Emissionsfaktoren wird der Grenzwert von den meisten Messungen nicht überschritten. Da auch dieses Fahrzeug einen Ottomotor besitzt, ist diese Beobachtung nicht überraschend. Alleinig der zweite WLTC bei niedriger Temperatur überschreitet den aktuellen Grenzwert deutlich. Dies liegt vor allem am Autobahnteil. Auch bei den Partikelemissionen wird der Grenzwert häufig überschritten. Ein Partikelfilter, wie er in vielen neueren Fahrzeugen bereits vorhanden ist, würde die Partikelemissionen deutlich reduzieren. Ein im Eco Modus (100 % SOC) durchgeführter Versuch, bei dem eine RDE Strecke auf dem Rollenprüfstand nachgefahren worden ist, zeigt ähnliche Durchschnittswerte an CO₂, CO, NO_x und PN wie die im gleichen Modus gefahrenen Tests auf der Straße.



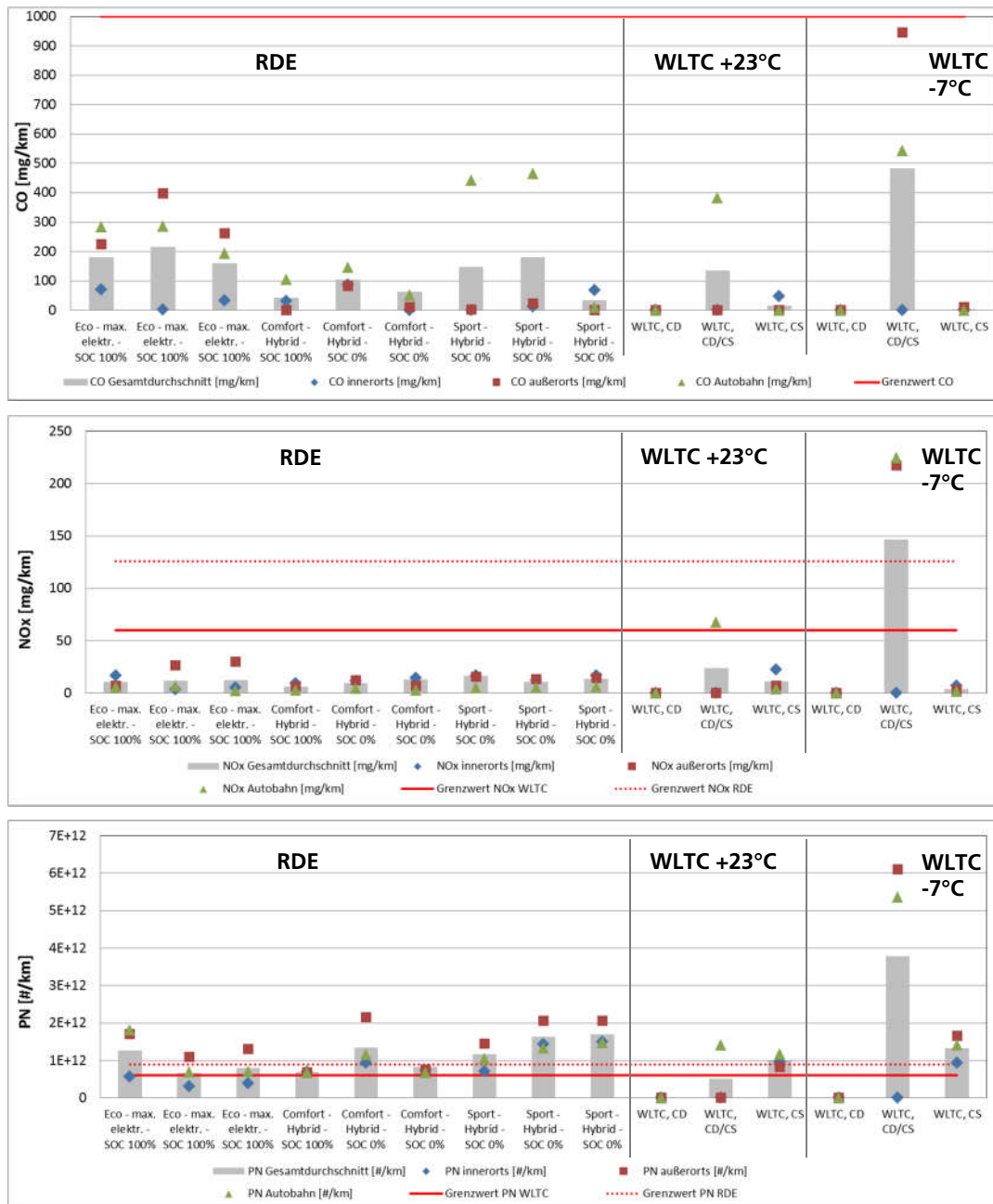


Abbildung 42: Vergleich der CO₂- und Schadstoffemissionen der RDE und WLTC Test des VW Golf GTE inkl. des aktuellen Grenzwertes

BMW 330e

Weiterhin werden die Test bezüglich der durchschnittlichen Emissionen im Gesamttest sowie in den Abschnitten innerorts, außerorts und Autobahn analysiert. Abbildung 43 zeigt diese durchschnittlichen CO₂-Emissionen in g/km für den BMW 330e durchgeführten Messungen. Bei den RDE Fahrten werden die drei Straßentypkategorien nach den gefahrenen Geschwindigkeiten zugeordnet, bei den WLTC Fahrten nach den Zyklusabschnitten. Es zeigt sich, dass die CO₂-Emissionen bei moderater Temperatur im

RDE Test bei Auswahl des dynamischen Fahrmodus und anfangs leerer Batterie deutlich höher liegen als bei den anderen Fahrten mit voller oder leerer Batterie. Auch zeigt sich deutlich, dass unabhängig vom Straßentyp oder Fahrmodus ein direkter Zusammenhang zwischen elektrischer Fahrleistung und den CO₂ Emissionen (bzw. Kraftstoffverbrauch) besteht, die kontinuierlich mit steigendem elektrischen Anteil abnehmen (Abbildung 44).

Es zeigt sich bei den anderen in Abbildung 45 dargestellten Schadstoffemissionen, dass die absoluten Werte bei den Messungen bei -7°C zum Teil deutlich höher liegen als bei gemäßigten Temperaturen. Der Test im dynamischen Fahrmodus sticht ebenfalls nicht mehr heraus. Ein auf dem Rollenprüfstand nachgefahrener RDE Zyklus im Hybrid-Modus mit 100 % SOC zu Beginn der Fahrt ergibt Durchschnittswerte an CO, NO_x und PN im Streubereich der auf der Straße gemessenen Werte. Werden die heute gültigen RDE Grenzwerte als Bezug genommen, so hält das Fahrzeug die Werte bei CO und NO_x ein, überschreitet sie jedoch im Falle der Partikel in einigen Fällen. Hierbei ist zu beachten, dass das Fahrzeug die Grenzwerte in der Regel einhält, die bei der Typzulassung gegolten haben.

Im Gegensatz zu den CO₂ Emissionen lässt sich kein direkter, linearer Zusammenhang zwischen dem elektrischen Fahranteil und der Menge der Schadstoffemissionen feststellen (Abbildung 46). Zwar sind die höchsten Werte bei geringem elektrischen Anteil und -7°C gemessen worden, jedoch ist lediglich bei einem 100%igen elektrischen Anteil ein Zusammenhang deutlich. Ansonsten sind die durchschnittlichen Schadstoffemissionen unabhängig von Fahrmodus und elektrischem Anteil relativ ähnlich verteilt.

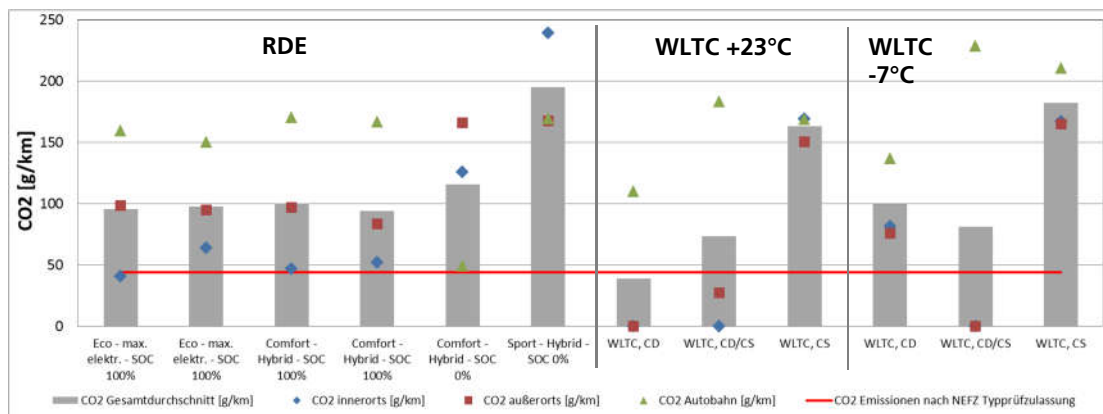


Abbildung 43: Vergleich der CO₂ Emissionen der RDE und WLTC Tests des BMW 330e

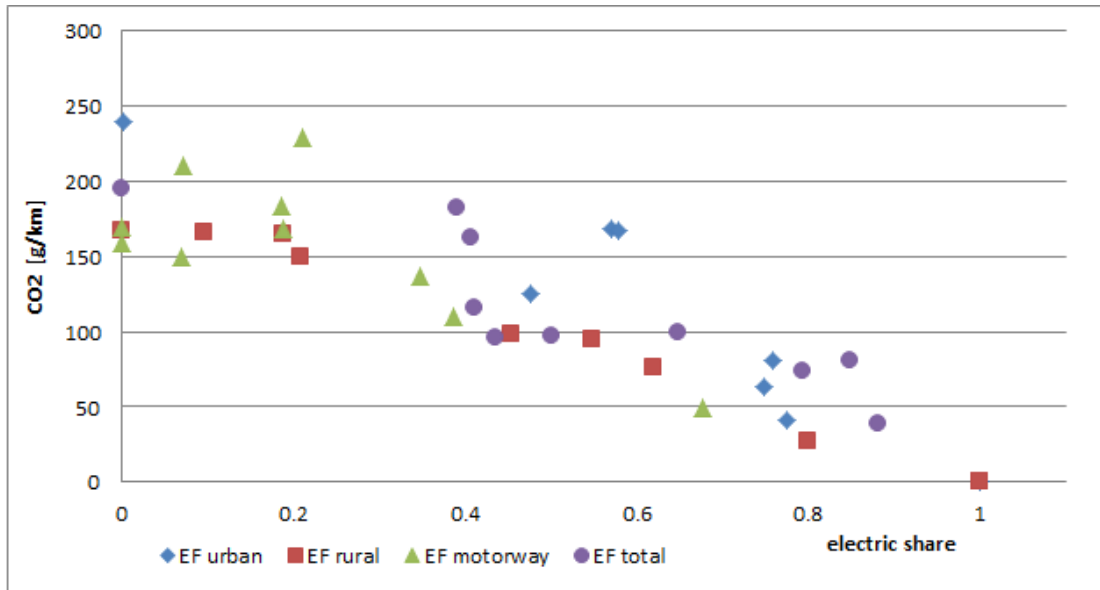
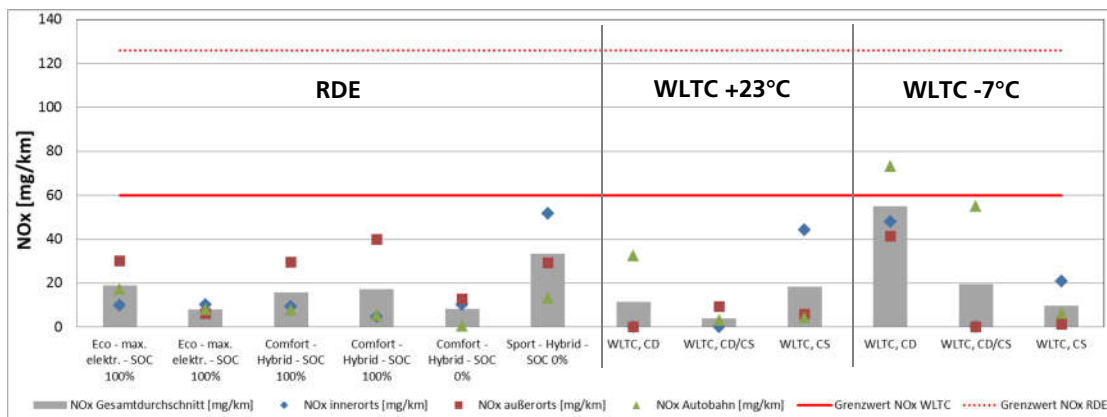
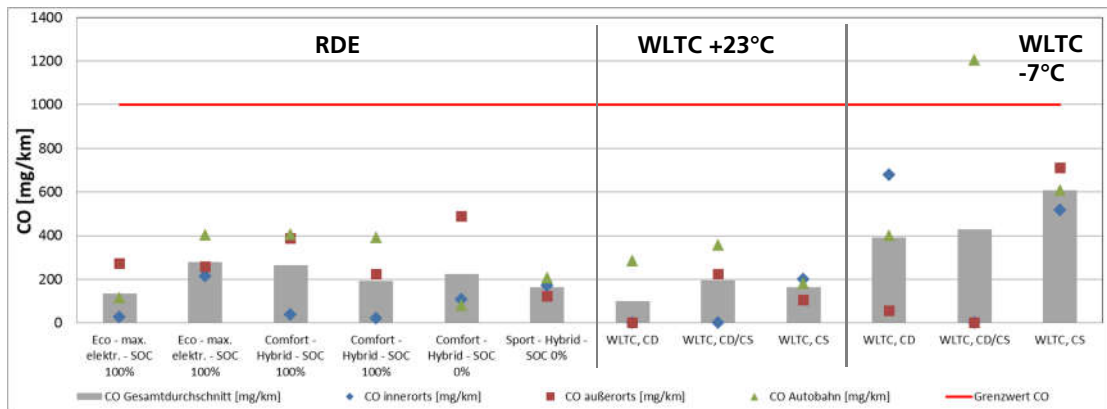


Abbildung 44: Verhältnis zwischen CO₂ Emissionen und elektrischem Fahranteil beim BMW 330e



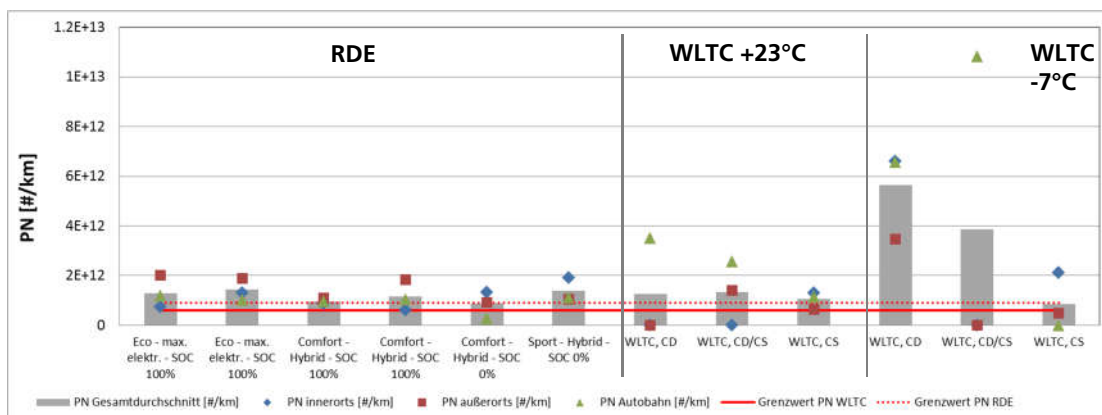


Abbildung 45: Vergleich der Schadstoffemissionen der RDE und WLTC Tests des BMW 330e

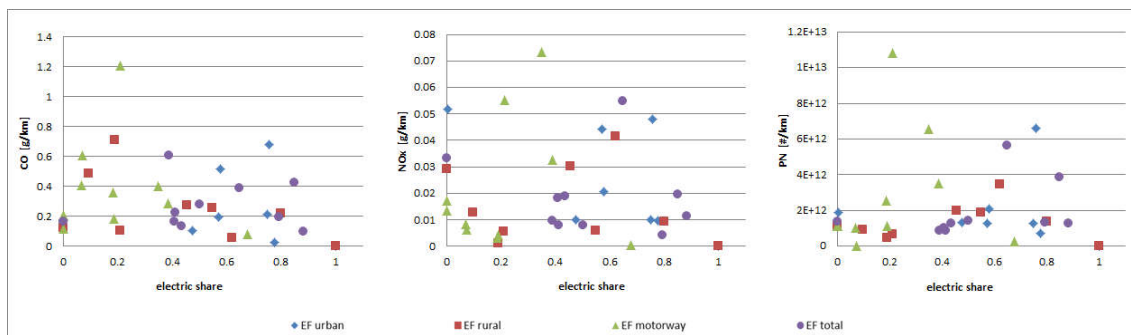


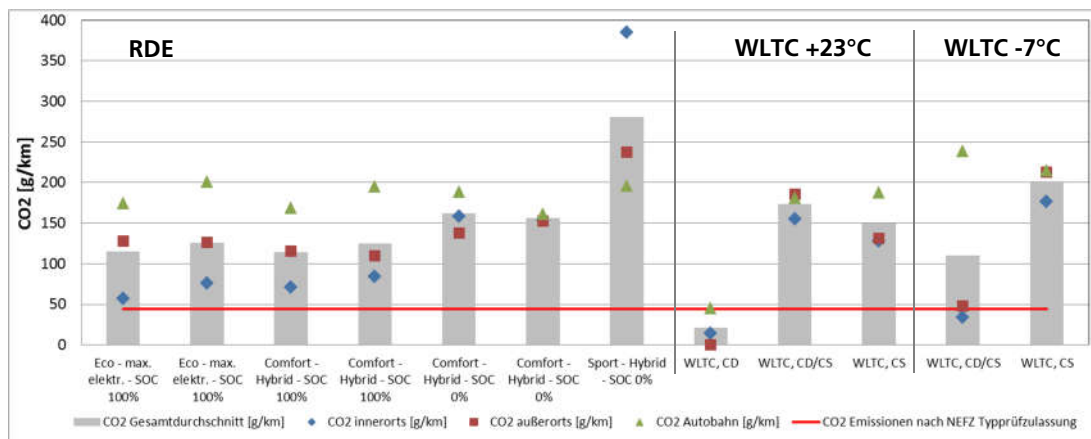
Abbildung 46: Verhältnis zwischen Schadstoffemissionen und Anteil elektrischen Fahrens

Mercedes C350e

In Abbildung 47 sind die Emissionen des Mercedes C350e mit den jeweiligen Grenzwerten dargestellt. Wie zu erwarten haben Messungen die mit voller Batterie gestartet wurden, am Ende geringere CO₂-Emissionen. Der aktuelle Grenzwert, bzw. der aktuelle Flottenverbrauch wird bei den RDE-Fahrten nur bei den Messungen mit vollgeladener Batterie bei Teststart eingehalten. Dabei macht es so gut wie keinen Unterschied, ob der Fahrmodus Hybrid oder eDrive, was dem Eco-Modus entspricht, gewählt wurde. Der Test mit Fahrmodus Sport+ überschreitet den Flottengrenzwert deutlich. Bei den Tests auf dem Rollenprüfstand ist die Situation ähnlich. Ist die Batterie bei Teststart vollgeladen, so wird der Flottenverbrauch beim WLTC und NEFZ zum Teil deutlich unterschritten. Hat die Batterie bei Teststart nicht den definierten Zustand vollgeladen, so wird der Grenzwert überschritten. Interessant ist auch der Vergleich bei verschiedenen Temperaturen. Die CO₂-Emissionen sind bei -7°C Umgebungstemperatur insgesamt höher als bei 23°C Umgebungstemperatur. Dieser Unterschied wird insbesondere beim WLTC sichtbar. Vergleicht man die gemessenen CO₂-Emissionen mit dem offiziellen NEFZ-Wert aus Tabelle 5, so wird deutlich, dass dieser Wert im realen Fahrbetrieb nicht eingehalten werden kann. Laut offizieller Zulassungsmessung emittiert die C-Klasse lediglich 48 g/km. Dieser Wert wird nur bei einzelnen NEFZ Messungen mit hohem elektrischen Anteil eingehalten.

Bei den CO-Emissionsfaktoren ist der Unterschied den die Batterieladezustände bei Teststart verursachen nicht mehr so ausgeprägt. Bei den RDE-Fahrten liegen die CO-Emissionsfaktoren alle im unteren Niveau und halten den Grenzwert ein. Lediglich ein

Ausreißer ist zu beobachten. Dies liegt an dem sehr schlechten Ergebnis im „außerorts“ Streckenabschnitt. Beim Test „Comfort Hybrid - SOC 100%“ startet der Verbrennungsmotor in einer sehr ungünstigen Beschleunigungsphase. Dadurch wird CO gebildet und der kalte Katalysator kann dieses schlecht umsetzen. Insgesamt wird aber auch bei diesem Test der Grenzwert eingehalten. Auch bei den Prüfstandsmessungen wird der CO-Grenzwert zumeist eingehalten. Lediglich bei zwei NEFZ bei -7°C Umgebungstemperatur wird der Grenzwert überschritten. Beim ersten der beiden Tests ist der Motor trotz voller Batterie bei Teststart angegangen. Dadurch kommen die hohen CO-Emissionen zustande. Beim zweiten Test startet der Verbrennungsmotor im letzten Abschnitt des NEFZ. Die Geschwindigkeit ist in diesem Bereich relativ hoch. Dies hat zur Folge, dass der kalte Katalysator viel CO sieht, dass er wiederum nicht umsetzen kann. Wie zu erwarten hat das Hybridfahrzeug mit Benzinmotor keine Probleme bei den NO_x -Emissionen. Dies liegt vor allem an den Temperaturen im Brennraum. Die Temperaturen sind bei Otto-Motoren bei den meisten Betriebspunkten geringer als bei Dieselmotoren und somit wird weniger NO_x gebildet. Alle RDE- Messungen halten den NO_x -RDE-Grenzwert ein. Bezüglich der Partikelemissionen lässt sich feststellen, dass die meisten Messungen oberhalb des Grenzwertes liegen. Die RDE-Messungen die mit vollgeladenen Batterie gestartet sind, weisen höhere Partikelemissionen als Testfahrten mit Start – SOC = 0%. Bei den Messungen auf dem Rollenprüfstand kann man einen Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und ausgestoßenen Partikeln erkennen. Bei Tests mit -7°C Umgebungstemperatur gibt es mehr Partikelemissionen als bei Tests mit 23°C Umgebungstemperatur. Eine ebenfalls auf dem Rollenprüfstand durchgeführte Testfahrt mit einem RDE-Profil im Eco-max 100% SOC Modus zeigt bei allen gemessenen Emissionen Durchschnittswerte im Bereich der Bandbreite der anderen RDE Messungen.



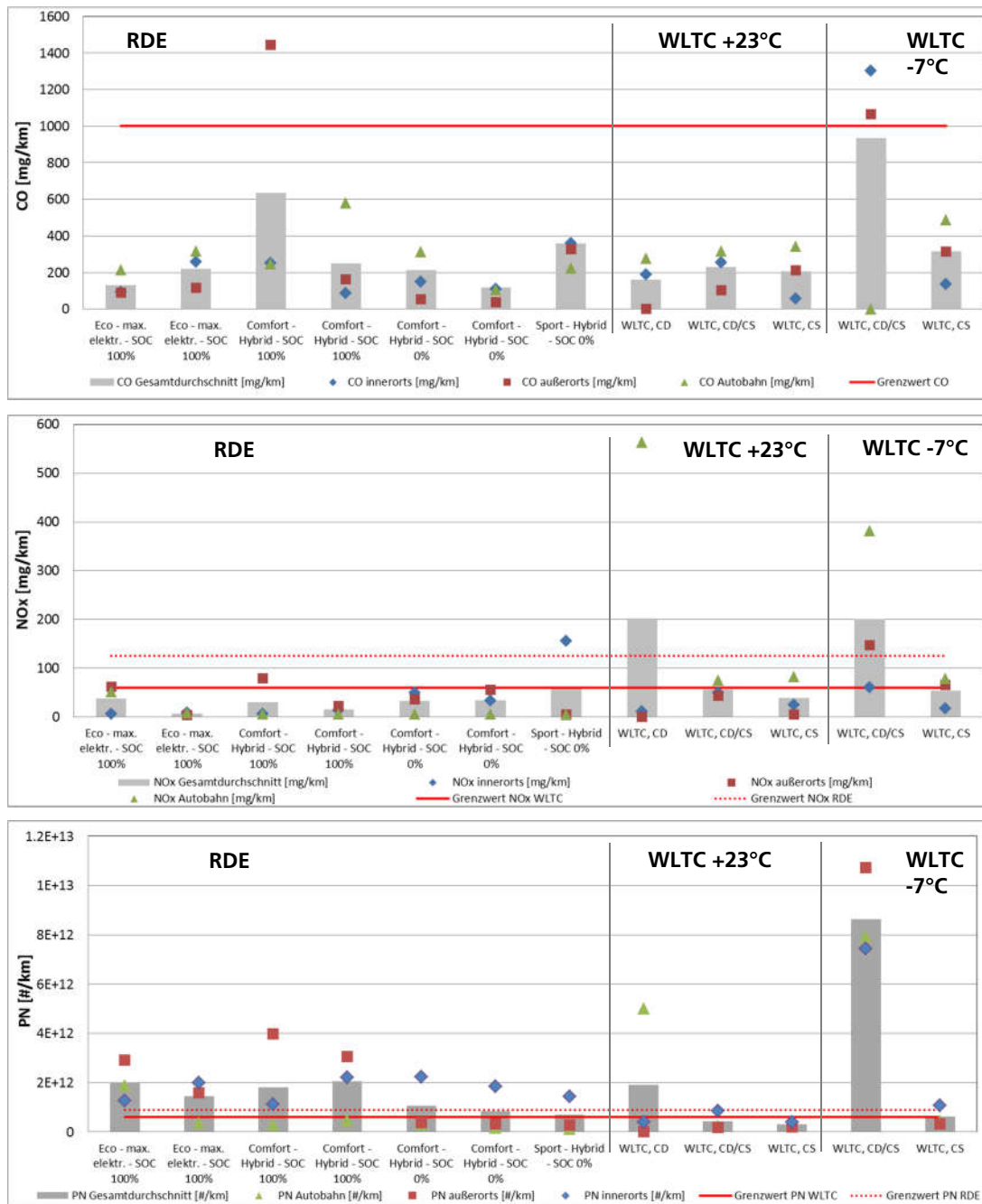


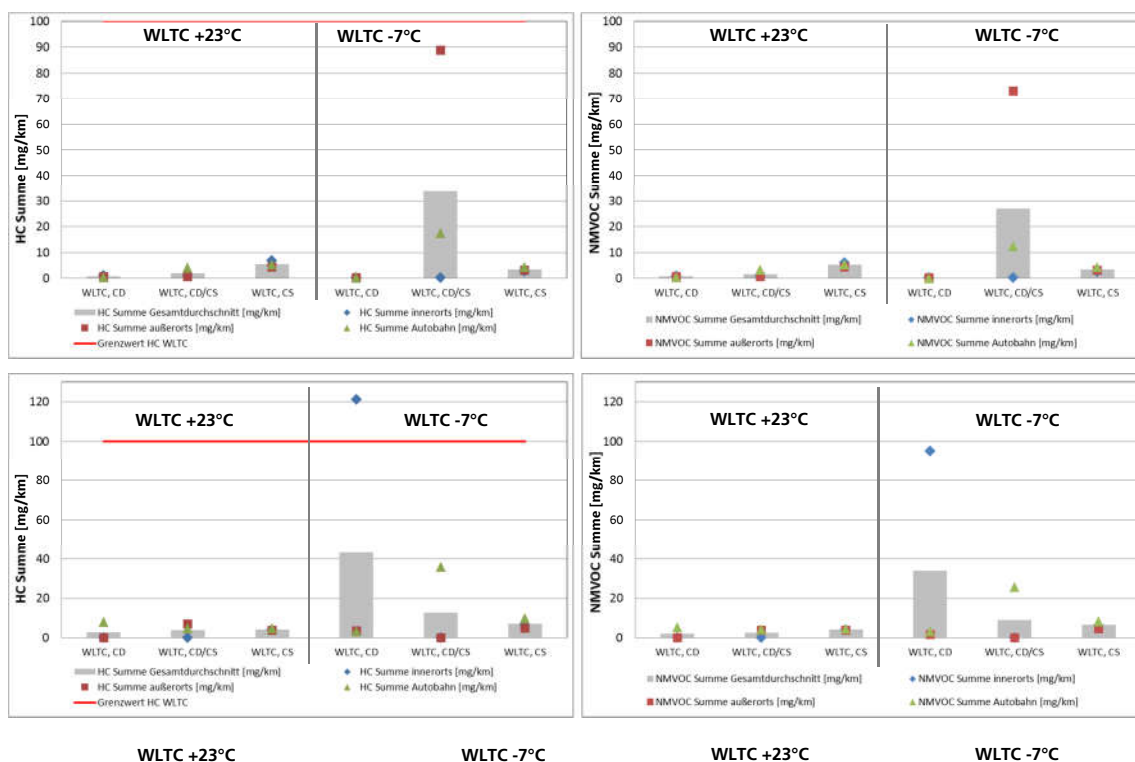
Abbildung 47: Vergleich der CO₂- und Schadstoffemissionen der RDE und WLTC Tests des Mercedes C350e

7.1.3 Emissionen von Kohlenwasserstoffen bei den Prüfstandsmessungen

Im Falle der Prüfstandsmessungen werden neben den Anteilen an CO₂, CO, NO_x und PN weitere Abgasbestandteile erfasst (s. Kapitel 4.2). Neben den in der RDE-Gesetzgebung erfassten Abgasbestandteilen kommt den Kohlenwasserstoffen eine besondere Bedeutung zu. Für die Summe der Kohlenwasserstoffe existiert ein Grenzwert in der EURO-Normung.

Darüber hinaus hat es in den letzten Jahren verschiedene Untersuchungen zur Bedeutung der Emission von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und von Nicht-Methan-VOC (NMVOC) aus dem Straßenverkehr gegeben, da diese Gruppe eine besondere Rolle sowohl für die Bildung von Photooxidantien (insbesondere Ozon) als auch für die Entstehung von klimawirksamen sekundären organischen Aerosolkomponenten (SOA) spielt.

Für die vorliegende Auswertung werden die bei der FTIR-Spektroskopie detektierten Kohlenwasserstoffe zum einen zu Kohlenwasserstoffemissionen (HC, Abbildung 48 links) und den zum anderen zu Nicht-Methan-VOC¹⁵ (NMVOC, Abbildung 48 rechts) zusammengefasst. Es wird deutlich, dass analog zu den in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Schadstoffen die HC-Emissionen bei den -7°C-Messungen durch die stattfindenden Kaltstarts um mehr als das 10-fache höher als bei 23°C im Falle des VW Golf GTE und des BMW 330e und das 5-fache beim Mercedes C350e. Insgesamt die die HC und NMVOC des VW Golf GTE geringer als bei den anderen beiden Fahrzeuge, was dem geringeren Hubraum und der geringeren Leistung geschuldet ist. Weiterhin wird deutlich, dass zumindest in der Gruppe der in diesen Tests gemessenen Kohlenwasserstoffe, die NMVOC einen Großteil der gesamten HC-Emissionen ausmachen.



¹⁵ Die Summe der NMVOC umfasst in diesem Fall folgende Substanzen: Formaldehyd (HCHO), Ethen (C₂H₄), Ethan (C₂H₆), Propen (C₃H₆), 1,3-Buthadien (1,3-C₄H₆), Benzol (C₆H₆), Toluol (C₇H₈), Isopren (C₅H₈) und Acetaldehyd (CH₃CHO)

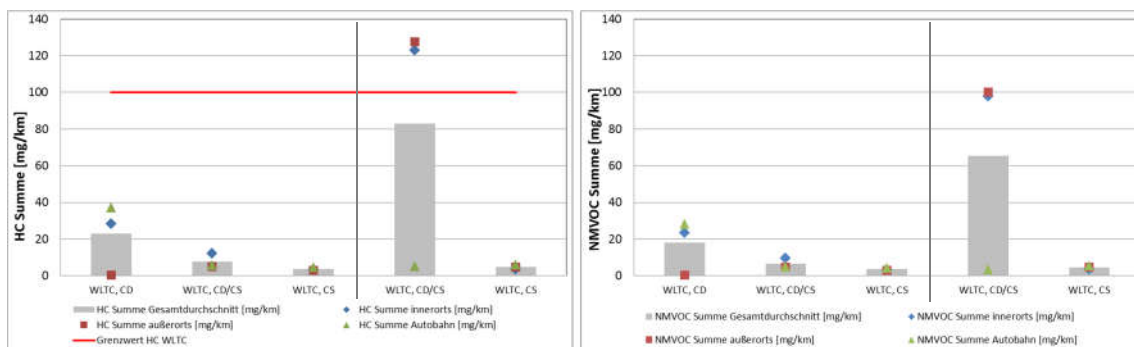


Abbildung 48: Kohlenwasserstoff- und NMVOC-Emissionen der WLTC-Messungen des VW Golf GTE (oben), des BMW 330e (Mitte) und des Mercedes C350e (unten)

7.2 Verbrauchsmessungen

Je nach ausgewähltem Fahrmodus wählen die Fahrzeuge eine andere Betriebsstrategie, welche sich auf die Wahl des Antriebes sowie auch auf alle Hochvoltkomponenten auswirkt. Dies gilt sowohl für die maximale Antriebsleistung oder auch Geschwindigkeit im rein elektrischen Fahren, als auch für die Hochvoltnebenverbraucher wie den PTC¹⁶ Heizer und den elektrischen Klimakompressor, welche sich je nach Verwendung entsprechend sehr stark auf die Reichweite auswirken können.

Um für die durchgeführten Fahrten eine Energiebilanz über die Hochvolt-(HV)-Batterie ermitteln zu können, werden direkt an der HV-Batterie die Spannung und der Strom gemessen. Ebenso werden die elektrischen Nebenverbraucher sowie der Strom welcher in das 12V Bordnetz gespeist wird gemonitort, um ggf. Aussagen über den prozentualen Anteil der Nebenverbraucher treffen zu können.

Insofern möglich wird bei jedem der Fahrzeuge bei einer Betätigung des Bremspedals primär die Rekuperation, also die Rückgewinnung von Bremsenergie in Strom verwendet. Dies wird vor allem bei den Fahrten, welche im Sport Modus durchgeführt wurden sichtbar, da zum Teil ohne Ladeeffekte aus dem Verbrennungsmotor die in der Hochvoltbatterie gespeicherte Energie steigt.

7.2.1 Hauptverbraucher

Die energetisch gesehen größten Verbraucher in einem Plug-In-Hybrid Fahrzeug sind der Verbrennungsmotor und der Elektromotor, welche Ihre Energien für den Antrieb des Fahrzeuges verwenden.

Jedoch unterscheiden sich der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstranges und der des verbrennerisch betriebenen Antriebsstranges stark. Energetisch gesehen ist es aufgrund des Wirkungsgrades vorteilhafter, das Fahrzeug rein elektrisch anzutreiben. Je nach Zusammensetzung des Strommixes kann dies zu einer verbesserten CO₂Bilanz des Fahrzeuges führen.

Bei einigen Fahrzeugen wird hinsichtlich der ausgewählten Betriebsstrategie auch dahingehend unterschieden, ob im Navigationssystem die entsprechende gewünschte Fahrroute

¹⁶ Positive-Temperature-Coefficient

hinterlegt ist oder nicht. Je nachdem passt sich die Betriebsstrategie an, sodass innerorts wenn möglich elektrisch und außerorts mit dem Verbrennungsmotor gefahren werden kann.¹⁷ Diese Funktion wurde jedoch für die durchgeführten Tests nicht berücksichtigt, sodass während der RDE-Fahrten keine Navigationseingabe genutzt wurde. Das Einsparpotential gerade im Bereich der innerstädtischen Emissionen ist jedoch nicht zu unterschätzen. Ebenfalls wurde untersucht, ob es bei den Fahrzeugtests auf dem Rollenprüfstand zu einem geänderten elektrischen Verhalten kam im Vergleich zu den RDE-Fahrten, wie beispielsweise, dass während der Prüfstandstests mehr Strom aus der Batterie gezogen wird, was auf eine prüfstandsoptimierte Software hindeuten würde.

7.2.2 Energie und Kraftstoffverbräuche

Die aus dem Hochvoltnetz genutzten Energien, welche sich aus Strom und Spannung berechnen lassen, wurden mit einer Stromzange direkt zwischen HV-Batterie und Leistungselektronik gemessen, um entsprechende Leistungsverluste in der Leistungselektronik mit berücksichtigen zu können. Ein negativer Messwert bedeutet, dass der Strom aus der HV-Batterie in Richtung der Leistungselektronik geflossen ist. Ein entsprechender positiver Wert lässt rückschließen, dass Strom in die HV-Batterie geflossen ist, was nur der Fall sein kann, wenn die Betriebsstrategie entsprechend vorsieht, dass Energie durch den Verbrennungsmotor erzeugt und gespeichert werden soll oder die Bremsenergie zurückgewonnen wird. Die Energieerzeugung über den Verbrennungsmotor führt dazu, dass höhere Kraftstoffverbräuche und somit erhöhte Emissionen zu erwarten sind. Um einen breiten Überblick über das Fahrzeugenergieverhalten gewinnen zu können, wurden die RDE-Fahrten in verschiedenen Betriebszuständen durchgeführt. Durch Mehrfachmessungen konnten dann die Ergebnisse und das Fahrzeugverhalten verifiziert werden. Da jedoch die Außentemperatur und die möglichen fahrbaren Geschwindigkeiten je nach Messtag variierten, kam es bei diesen Tests zu leichten Streuungen.

Bei den Prüfstandstests wurde mit vollgeladener HV-Batterie begonnen. Dies führt dazu, dass gerade bei den bei 23°C durchgeführten Tests die ersten Zyklusfahrten meist rein elektrisch gefahren wurden und es keinen CO₂-Ausstoß und Kraftstoffverbrauch gab. Bei den Fahrten bei -7°C war dies nicht immer möglich.

7.2.2.1 Golf GTE

Wie in der folgenden Grafik der geflossenen Hochvoltenergien beim Golf GTE zu sehen ist, wurde je nach Ausgangslage und gewähltem Fahrmodus die Batterie entweder während der kompletten Fahrt geladen, es wurde die Energie komplett verbraucht oder es wurde Energie aufgehoben und somit kaum genutzt.

Das Fahrzeug startet beim Einschalten standardmäßig im E-Modus. Mit diesem ist je nach angeforderter Beschleunigung und Akkuladung bis zu 135 km/h rein elektrisches Fahren möglich. Bei Auswahl des Hybridmodus nutzt das Fahrzeug je nach Lastanforderung deutlich schneller den Verbrennungsmotor zur Unterstützung als im E-Modus. Bei Testfahrten

¹⁷ http://www3.mercedes-benz.com/fleet-sales/mobile/pdf/de/Umweltzertifikate/C350e_Umweltzertifikat_COMPACT.pdf

passierte dies durchschnittlich bei einem Beschleunigen von über 55 km/h. Während Fahrten mit hoher Geschwindigkeit und dem anschließenden Entlasten des Gaspedals, schaltet der Motor sofort aus und das Fahrzeug segelt rein elektrisch weiter. Im Sport/GTE-Modus ließ sich feststellen, dass der Verbrennungsmotor bei allen Beschleunigungs- und Konstantfahrten läuft. Sobald man jedoch vom Gaspedal weggeht, wird durch Rekuperation Energie in die HV-Batterie zurückgespeist und die Batterie somit wieder nachgeladen.

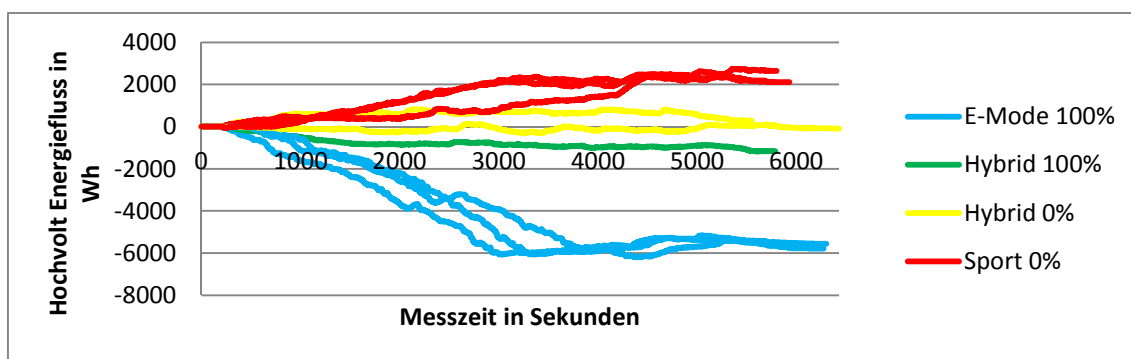


Abbildung 49: Golf GTE - RDE HV-Energieverbrauch

Wie in der Grafik zu erkennen ist, wurden bei den Fahrten im E-Modus mit einem angezeigten SOC von 100% die in der Batterie gespeicherte Energie komplett ausgenutzt, was auch zu einer entsprechend hohen elektrischen Reichweite und einem entsprechenden niedrigen Kraftstoffverbrauch führt. Bei diesen Fahrten konnten aus der 8,7 kWh großen Batterie circa 6 kWh entnommen werden, bis der SOC einen Ladezustand von 0% anzeigte. Die Differenz zwischen enthaltenem und nutzbarem Energieinhalt ergibt sich unter anderem aus den vom Hersteller gewählten Grenzen für das Laden und Entladen um eine möglichst hohe Batteriehaltbarkeit gewährleisten zu können und aus dem Wirkungsgrad der Batterie.

Im Hybridmodus dagegen wurde unabhängig vom Ladezustand der Batterie diese nur geringfügig verwendet. Bei einem angezeigten Ladezustand von 100% wurde nur etwa 1 kWh der Batterieenergie genutzt, was zu einem entsprechend hohen Kraftstoffverbrauch führte. Die restliche Energie verblieb in der Batterie, sodass das Fahrzeug am Ende der Messfahrt noch eine entsprechend große elektrische Restreichweite anzeigte. Bei der Fahrt im Hybridmodus mit 0 % Ladezustand wurde der SOC konstant gehalten, sodass weder große Stromanteile in die Batterie gespeist wurden, als auch kaum etwas genutzt wurde. Die durch das regenerative Bremsen zurückgewonnene Energie wurde direkt wieder genutzt um sowohl das Bordnetz zu laden, die HV Nebenverbraucher zu versorgen, als auch um elektrisch anzufahren.

Im Sportmodus dagegen lief der Verbrenner während der gesamten Messfahrt. Durch das regenerative Bremsen und den Verbrennerbetrieb bei Fahrten ohne Lastbedarf konnte die HV-Batterie geladen werden. Für das Antreiben des Fahrzeuges wurde in diesem Modus keinerlei elektrische Energie verwendet. Dies führt entsprechend auch zu einem extrem geringen elektrischen Fahranteil und einem höheren Kraftstoffverbrauch.

Um die unterschiedlichen Modi hinsichtlich ihres Kraftstoffverbrauchs vergleichen zu können, sind in der folgenden Grafik die entsprechenden Messungen des im Fahrzeug eingebauten Kraftstoffsensors dargestellt. Eine Verbrauchsberechnung aus dem ausgestoßenen CO₂ wurde an dieser Stelle nicht durchgeführt.

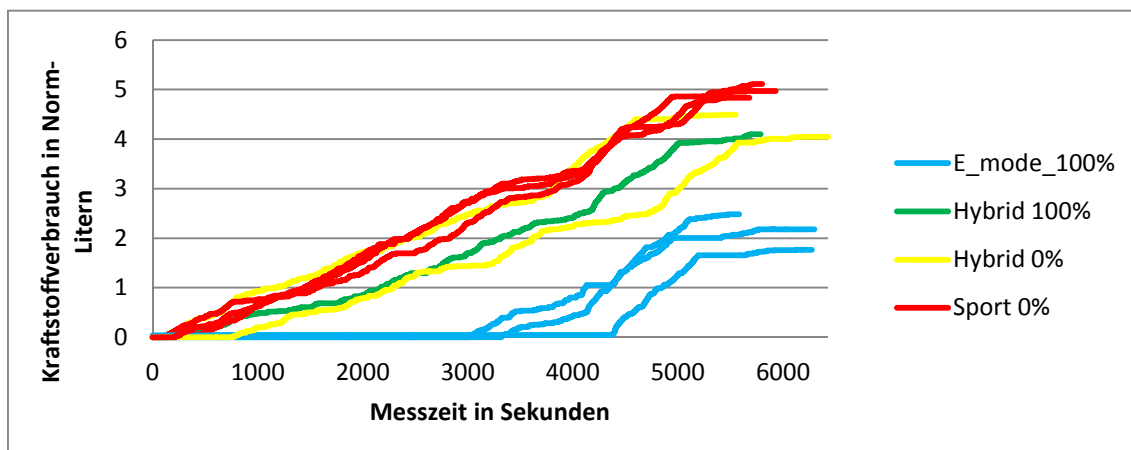


Abbildung 50: Golf GTE - RDE normierter Kraftstoffverbrauch

Da Benzin eine hohe volumetrische Temperaturabhängigkeit aufweist, wurde das Kraftstoffvolumen bei allen Messungen auf 15°C normiert. Analog zur vorherigen Grafik ist zu sehen, dass Fahrten, bei denen ein Großteil der Energie aus der HV-Batterie genommen wurde, einen sehr geringen Kraftstoffverbrauch aufweisen. So verbrauchte der Golf im E-Modus mit voller Batterie im E-Mode nur etwa 2L Benzin für die 95 min andauernde und 78 km lange RDE Strecke mit eingeschalteten Nebenverbrauchern, realen Fahrtbedingungen und realen Fahrtwiderständen. Im Hybrid Modus mit dem nahezu konstant gehaltenem Energiezustand waren es ca. 4l, da hier nur der Start-Stopp Effekt Nutzen tragen konnte. Im Sport Modus waren es im Durchschnitt 5 L Kraftstoff für die 78 km, wobei jedoch Energie in Form von Strom in die Hochvoltbatterie gespeist und somit gewonnen wurde.

Sowohl die genutzte Energie als auch der verwendete Kraftstoff lassen sich ebenfalls anhand der mit dem jeweiligen Antrieb zurückgelegten Strecken verdeutlichen. Diese sind für die RDE-Fahrten in der folgenden Grafik dargestellt. Rot dargestellt ist die Strecke, die zurückgelegt wurde während der Verbrennungsmotor lief. Blau ist dagegen die Strecke welche zurückgelegt wurde während der Verbrennungsmotor ausgeschaltet war.

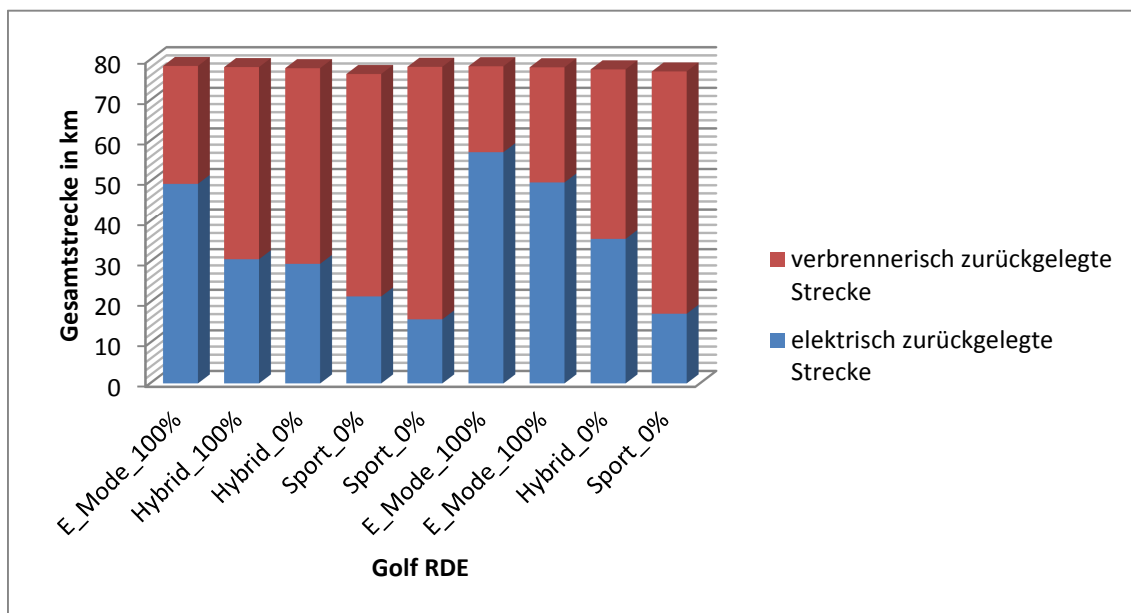


Abbildung 51: Golf GTE - RDE Streckenanteile

Die Aussage, ob elektrisch oder mit dem Verbrennungsmotor gefahren wurde, ergab sich aus dem Strom zu den Zündspulen, der Motordrehzahl und den Kraftstoffdurchfluss. Dies führt dazu, dass die elektrisch zurückgelegte Strecke auch Streckenanteile berücksichtigt in denen „gesegelt“ wurde. Aus diesem Grund weisen die Fahrten im Hybrid Modus auch einen sehr hohen elektrischen Streckenanteil auf. Wie anhand der Messungen mit voller Batterie im E-Mode zu sehen ist, war es möglich mit dem Golf, trotz eingeschalteter Nebenverbraucher für die ausgewählten RDE Strecke auf einen elektrischen Streckenanteil von bis zu 55 km zu kommen. Dies ist mehr, als im Datenblatt mit 50 km elektrischer Reichweite angegeben ist. Dies ergibt sich jedoch unter anderem auch aus den „gesegelten“ Anteilen. Die Fahrten im Hybridmodus zeigten unabhängig vom Ladezustand eine zurückgelegte elektrische Strecke von etwa 30 km. Im Sportmodus dagegen waren es 11-18 km die elektrisch zurückgelegt wurden. Der rechnerisch kombinierte Verbrauch im RDE Betrieb mit der elektrischen Reichweite aus dem Datenblatt und dem Kraftstoffverbrauch während des RDE Zyklus führt zu Verbrauchswerten zwischen 2,7 l/100km im rein elektrischen Modus und 3,2 l/100km im Sportmodus.

Generell lässt sich zu den durchgeführten RDE Fahrten mit dem Golf GTE sagen, dass der Nutzen der Hybridisierung stark abhängig vom Ladeverhalten des Betreibers und dem gewählten Betriebsmodus ist. Dabei ist es von Vorteil, dass das Fahrzeug standardmäßig im E-Modus startet.

Zusätzlich zu den RDE Fahrten wurden Prüfstandsfahrten mit dem Golf durchgeführt. Als Ausrollkoeffizienten für das Fahrzeug wurden die von VW bereitgestellten Fahrzeugrollen-koeffizienten für den NEFZ gewählt. Diese wurden dann für alle durchgeführten Prüfstandsfahrten genutzt. Es wurde auf dem Prüfstand der NEFZ und der WLTC bei jeweils 23°C und -7°C Umgebungstemperatur gefahren. Bei allen Fahrzyklen wurde mit voller Batterie gestartet und ein Zyklus nach dem anderen abgefahren, bis das Fahrzeug den Verbrennungsmotor zugeschaltet hat. Danach wurde noch ein Zyklus mit etwa ausgeglichener Ladebilanz gefahren. Der Kraftstoffverbrauch von jeder Durchfahrt des Zyklus im NEFZ und die entsprechenden Streckenanteile mit und ohne Verbrennungsmotor sind in den folgenden Grafiken dargestellt.

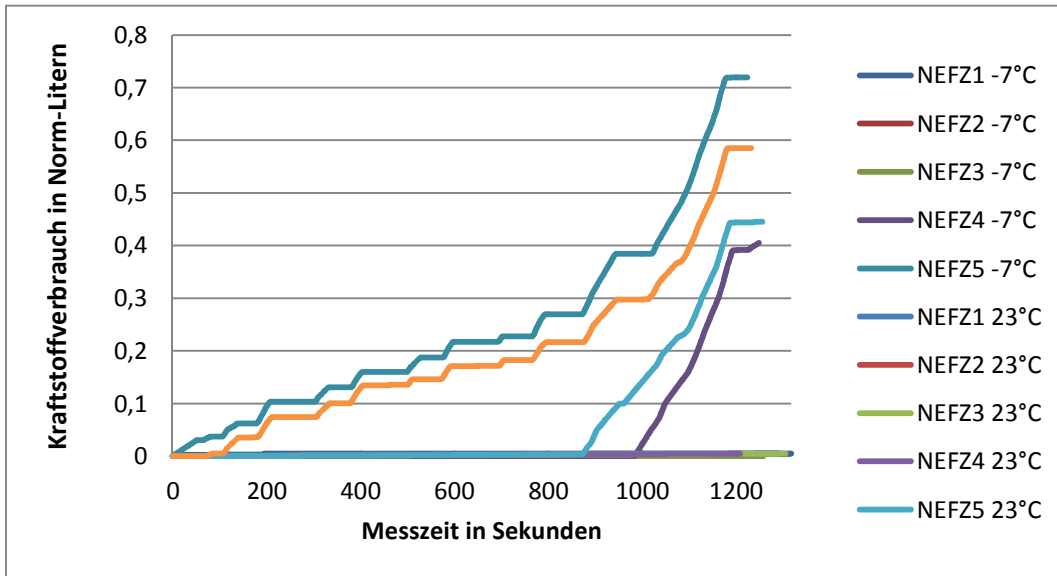


Abbildung 52: Golf GTE - NEFZ Kraftstoffverbrauch

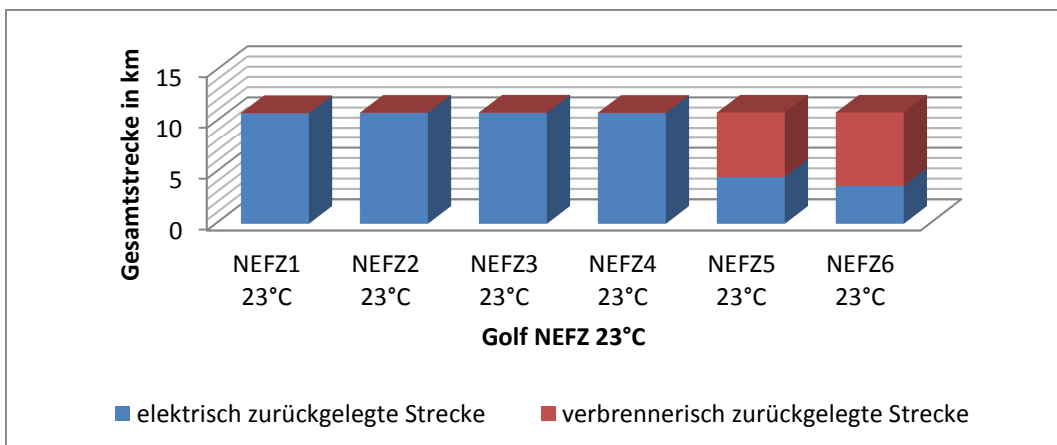


Abbildung 53: Golf GTE - NEFZ 23°C Streckenanteile

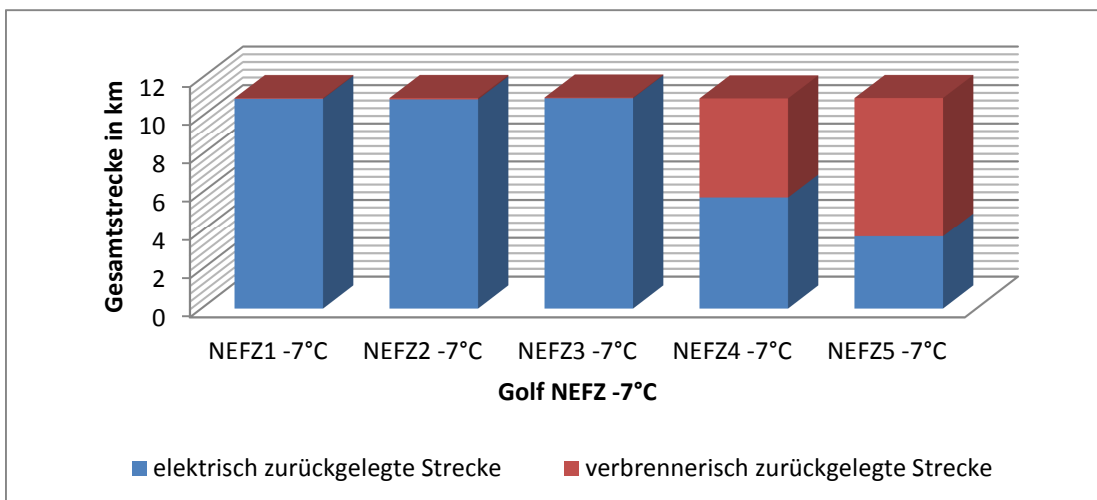


Abbildung 54: Golf GTE - NEFZ -7°C Streckenanteile

Die Fahrtstrecke pro NEFZ liegt bei durchschnittlich 10,8 km. Wie zu sehen ist, war es beim Norm-NEFZ bei 23°C fast möglich, die im Datenblatt angegebenen 50 km elektrische Reichweite zu erreichen, da erst gegen Mitte der 5. Durchfahrt der Verbrennungsmotor startete. Für die fast 50 km wurden analog wie bei den RDE-Zyklen etwa 6 kWh Energie aus der Batterie entnommen. Da beim NEFZ zwischen 20°C und 30°C Außentemperatur erlaubt sind, wäre durch eine Erhöhung der Umgebungstemperatur noch eine leichte Verbesserung der Reichweite zu erwarten gewesen. Bei -7°C schaltete der Verbrennungsmotor schon im 4. Zyklus zu, sodass sich die elektrische Reichweite aufgrund des erhöhten Energiebedarfs auf ca. 35 km reduzierte. Der Kraftstoffverbrauch im letzten Zyklus erhöhte sich ebenfalls im Vergleich zu dem NEFZ bei 23°C, da mehr Energie für die Aufheizung des Abgasstranges, des Motors, des Kühlmittels etc. benötigt wird. Für die jeweils letzten Zyklen waren bei 23°C und bei -7°C rein elektrisch eine Strecke von 3,5 km und 3,7 km zurücklegbar.

Beim WLTC waren die folgenden Ergebnisse messbar.

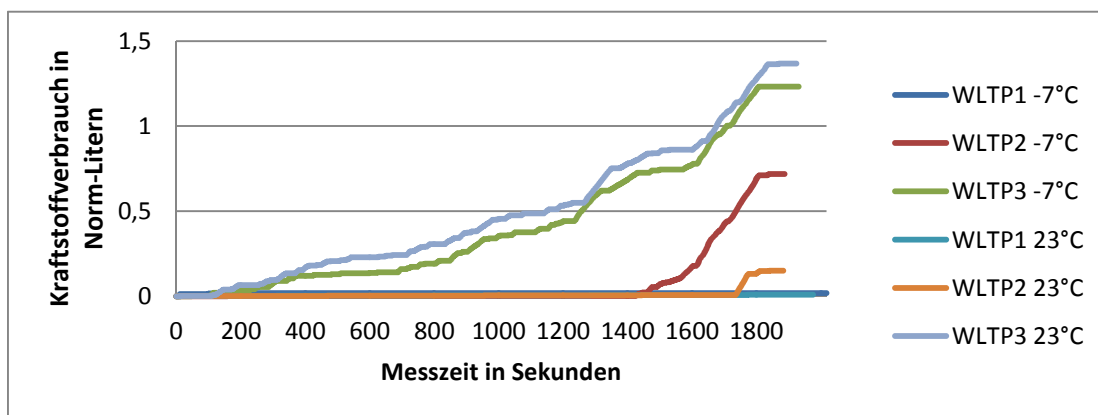


Abbildung 55: Golf GTE - WLTC Kraftstoffverbrauch

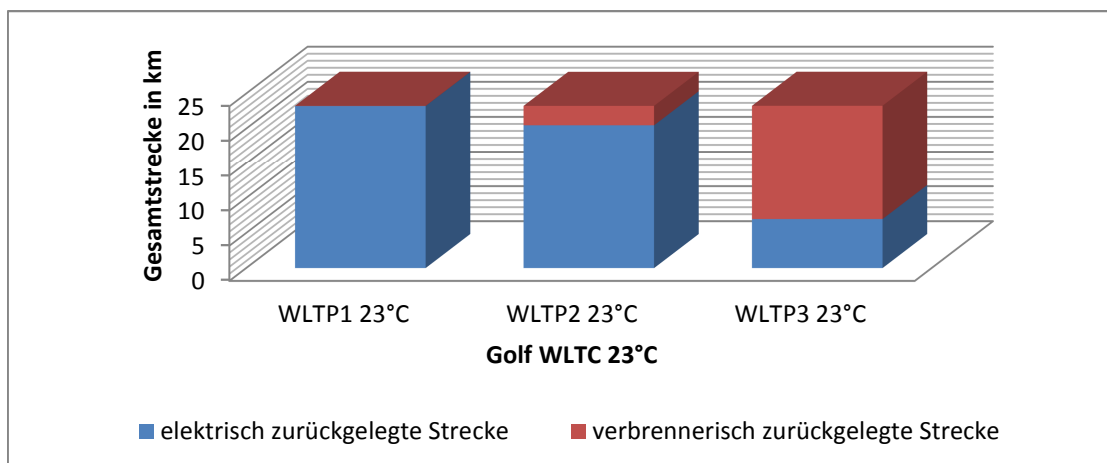


Abbildung 56: Golf GTE - WLTC 23°C Streckenanteile

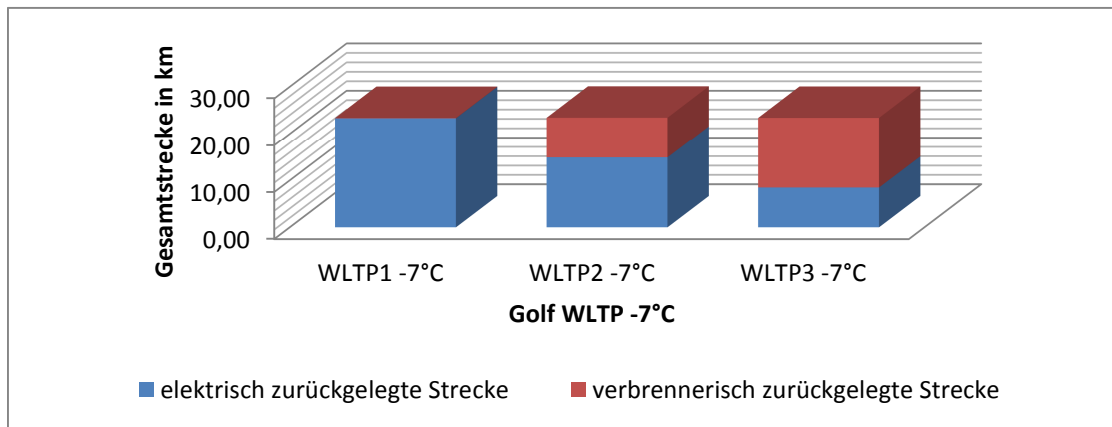


Abbildung 57: Golf GTE - WLTC -7°C Streckenanteile

Sowohl bei 23°C als auch bei -7°C war der erste Zyklus komplett elektrisch fahrbar. Erst bei der zweiten Durchfahrt des Zyklus ging der Verbrennungsmotor an. Bei 23°C entspricht das einer elektrischen Reichweite von ca. 43 km im WLTC wofür ebenfalls etwa 6 kWh Energie aus der HV-Batterie entnommen wurden. Bei -7°C ergab sich eine elektrische Reichweite von etwa 38 km. Änderungen an den rotatorischen Anteilen und der erhöhten Masse bei WLTC Tests im Vergleich zum NEFZ wurden hierbei nicht durchgeführt. Da der WLTC ein deutlich dynamischerer, streckenmäßig längerer Zyklus im Vergleich zum NEFZ ist und eine deutlich höhere Maximalgeschwindigkeit (131 km/h) aufweist, entsprechen die gemessenen Ergebnisse den Erwartungen aus den Realfahrten und den NEFZ Fahrten.

7.2.2.2 BMW 330e

Analog zum Golf soll auch beim BMW 330e mit einer Übersicht über den Energieverbrauch bei den RDE-Fahrten begonnen werden. Der BMW hat eine Batteriekapazität von 7,6 kWh und somit etwas weniger als der Golf und ist mit 40 km elektrischer Reichweite angegeben. Um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, ist die Messtechnik für die Strom und Spannungsmessungen analog zu der im Golf eingebaut. In der folgend gezeigten Grafik sind die Energieflüsse von und zur Hochvoltbatterie in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrmodi dargestellt.

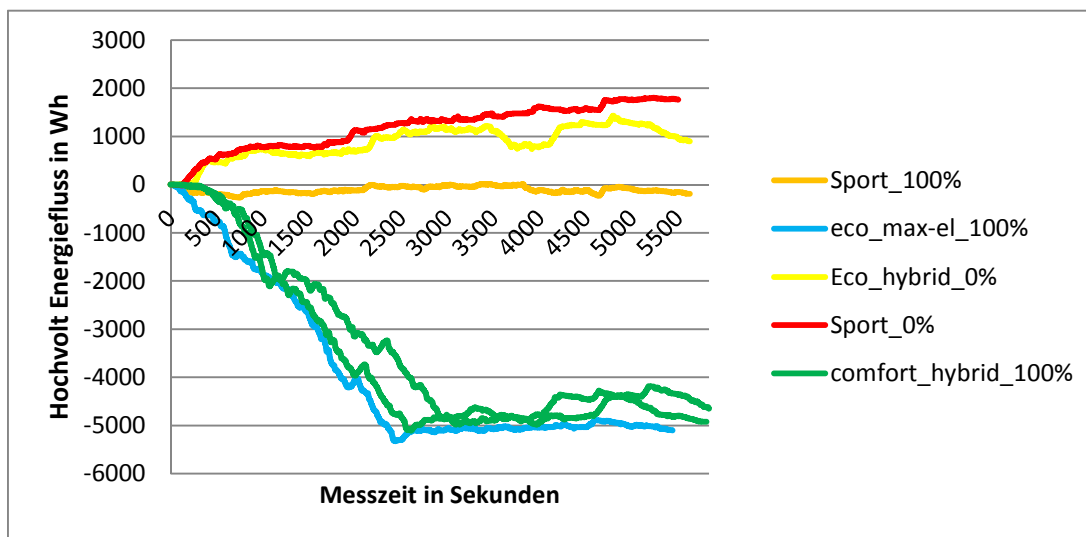


Abbildung 58: BMW 330e RDE HV-Energieverbrauch

Wie zu sehen ist, ist auch hier der Hochvoltenergiefluss und die Verwendung für den Vortrieb stark vom gewählten Modus und dem Ladezustand abhängig. Standardmäßig startet der BMW beim Einschalten im „AUTO eDrive“, was quasi den Hybridmodus darstellt und es ein „Systemgesteuertes elektrisches Fahren“ gibt. Die Fahrten im hybrid und im maximal elektrischen Modus („MAX eDrive“ mit maximalen elektrischen Fahren und reduzierter Leistung und Geschwindigkeit) verhielten sich nahezu identisch, was einen Unterschied zum Golf darstellt. Während dieser Fahrten war es möglich etwa 5 kWh Energie aus der Hochvoltbatterie zu nutzen. Im Sport Modus wurde analog zum Golf hauptsächlich mit dem Verbrennungsmotor gefahren und die Hochvoltbatterie nachgeladen. Zusätzlich wurde auch eine Fahrt im Sportmodus bei 100% Ladezustand durchgeführt. Dabei änderte sich der Ladezustand der Hochvoltbatterie nicht, da keine Energie zugeführt werden konnte. Bei der Fahrt im Hybrid-Modus mit vollständig entladener Batterie hat es den Anschein, dass die HV-Batterie bis zu einem gewissen Ladezustand aufgeladen und dieser dann gehalten wird.

Diese Unterschiede zeigen sich auch wie in der nächsten Grafik dargestellt im Kraftstoffverbrauch während der RDE-Fahrt.

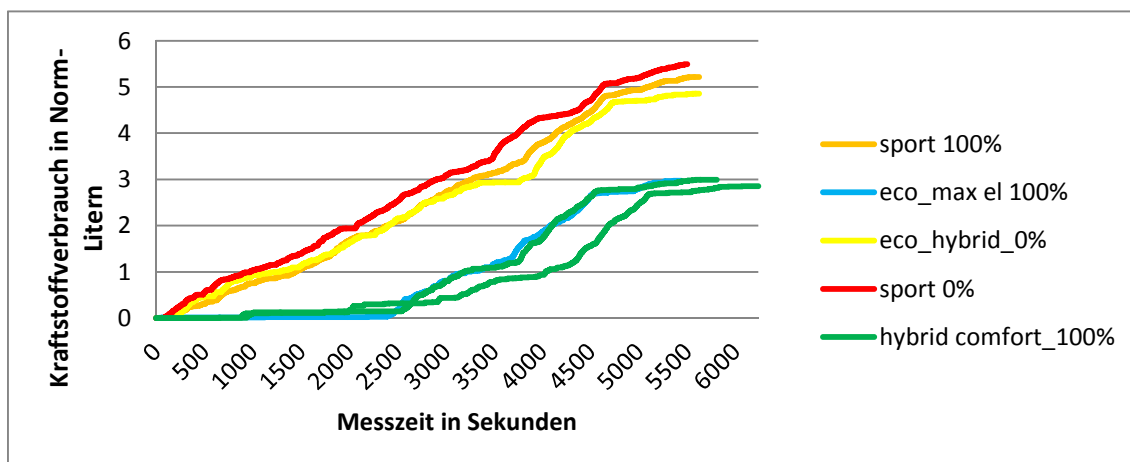


Abbildung 59: BMW 330e RDE Kraftstoffverbrauch

Alle durchgeführten RDE-Fahrten mit vollgeladenem Akku (unabhängig ob im Hybrid oder max. elektrischen Modus) zeigen den geringsten Verbrauch von um die 3l Kraftstoff für die 78 km, wobei um die 35 km der Strecke elektrisch gefahren wurde wie in der nächsten Grafik dargestellt ist. Der Kraftstoffverbrauch mit leerem Energiespeicher lag um die 5l bei der gefahrenen Strecke.

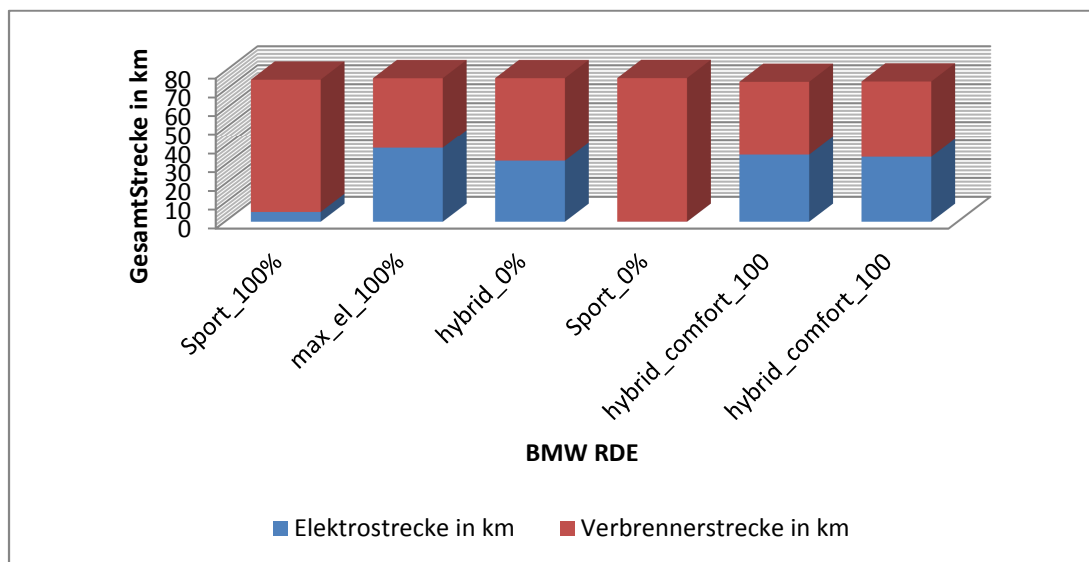


Abbildung 60: BMW 330e RDE Streckenanteile

Wie zu erkennen ist, wurde im Sportmodus nahezu ausschließlich elektrisch gefahren und der Motor schaltete sich selbst für das „Segeln“ nicht ab, unabhängig davon ob der Ladezustand der Batterie voll oder leer war. Im maximalen elektrischen Modus konnten zwischen 35 und 39 km elektrisch gefahren werden, was aufgrund der während der Tests eingeschalteten Nebenverbraucher der im Datenblatt angegeben elektrischen Reichweite recht gut entspricht. Auffallend ist, dass im Hybridmodus bei einem Ladezustand von etwa 0% es eine große elektrische Reichweite gab, der Kraftstoffverbrauch allerdings ebenfalls recht hoch ausfiel. Der rechnerisch kombinierte Verbrauch im RDE Betrieb mit der elektrischen Reichweite aus dem Datenblatt und dem Kraftstoffverbrauch während des RDE Zyklus führt zu Verbrauchswerten zwischen 2,8 l/100km und 4,2 l/100km.

Der BMW wurde ebenfalls auch auf dem im Institut für Fahrzeugkonzepte vorhandenen Rollenprüfstand für die beiden Normzyklen NEFZ und WLTC bei 23°C und -7°C untersucht. Die Ausrollkoeffizienten die für die Tests verwendet wurden, wurden von der amerikanischen Umweltbehörde genommen, welche die Fahrtwiderstände für die amerikanischen Testzyklen darstellen. Dies kann zu einer Abweichung und ggf. einem erhöhten Verbrauch im Vergleich zu den Herstellerangaben führen, da der BMW wie auch die anderen Fahrzeuge mit dem NEFZ zugelassen wurden, welcher unter anderem die Einteilung in Schwungmassenklassen etc. erlaubt. Ebenfalls wurde ein Augenmerk darauf gelegt, ob es Unterschiede darin gibt, wie viel Energie aus der Batterie im Vergleich zu den Realfahrten entnommen werden kann. Allerdings ließen die Messerergebnisse dabei auf keinerlei Auffälligkeiten rückschließen.

Für den NEFZ wurden bei 23°C die folgenden Ergebnisse erzielt. (inklusive Nachmessung, dargestellt mit 11, 12, 13 und 14)

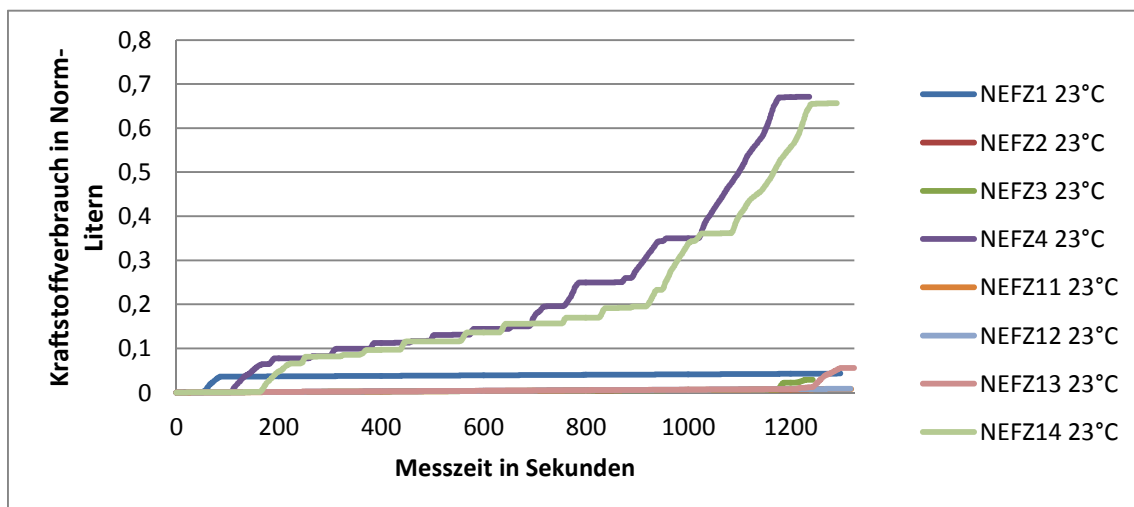


Abbildung 61: BMW 330e - NEFZ Kraftstoffverbrauch

Bei beiden Durchführungen mit 23°C ergab sich ein vergleichbares Ergebnis. Bei beiden versuchten schaltete sich der Verbrennungsmotor gegen Ende des 3. Zyklus zu, was einer elektrischen Reichweite von ca. 32km im NEFZ entspricht. Die Zyklen wurden analog zum Golf mit vollgeladener Batterie nacheinander im maximalen elektrischen Modus durchgeführt.

Beim WLTC ergaben sich bei 23°C die folgend dargestellten Messergebnisse.

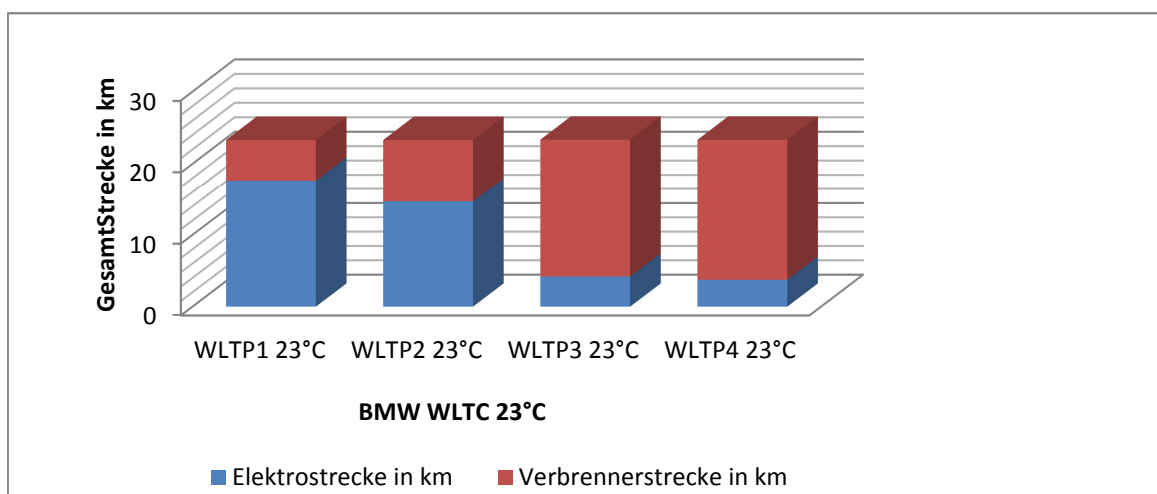


Abbildung 62: BMW 330e WLTC 23°C Streckenanteile

Schon während der ersten Durchfahrt schaltete sich bei Geschwindigkeiten die über den NEFZ hinausgehen der Verbrennungsmotor ein, was zu einer entsprechenden sehr geringen elektrischen Reichweite im Vergleich zum NEFZ führt.

Dies liegt daran, dass der BMW die maximalen 120 km/h welche beim NEFZ auftreten noch elektrisch fahren konnte, die 131 km/h welche beim WLTC gefordert sind jedoch nicht, sodass sich dort der Verbrennungsmotor ab dem 1. Zyklus in diesem Bereich zuschaltete. Bei -7°C konnte der BMW nicht elektrisch starten und der Verbrenner ging gleich ab Testbeginn an. Nach einiger Zeit, welche vermutlich für die Erwärmung verwendet wurde, lies sich dann ab dem zweiten Zyklus nach einem Zündungswechsel das elekt-

rische Fahren einschalten, jedoch waren auch bei dem zweiten Zyklus die 131 km/h elektrisch nicht möglich. Da jedoch der BWM noch mit dem NEFZ zugelassen wurde, bestand dahingehend auch noch kein Bedarf.

7.2.2.3 Mercedes C350e

Der Mercedes wurde analog zum Golf und BMW mit Messtechnik für die Hochvoltkomponenten, diversen Temperaturen und dem Kraftstoffmassendurchfluss versehen. Ebenso wurden in den ausgewählten Fahrmodi die entsprechende RDE Strecke abgefahren. Der Mercedes ist mit der geringsten elektrischen Reichweite der 3 Fahrzeuge mit 31 km und 6,4 kWh Batterieinhalt angegeben. Wie auch schon beim BMW konnte energetisch kein Unterschied zwischen dem Hybridmodus mit voller Batterie und dem rein elektrischen Modus festgestellt werden, obwohl sich die Betriebsstrategie zwischen den beiden Modi leicht verändert. Standardmäßig startet der Mercedes im Hybridmodus. In diesem ist der Zustart vom Verbrennungsmotor lastabhängig geregelt. Bei Versuchen im Realbetrieb konnte ermittelt werden, dass im Durchschnitt bei etwa 85 km/h der Verbrennungsmotor zu startete. Im maximal elektrischen Modus waren dagegen bis zu 135 km/h voll elektrisch möglich, da hier der Lastpunkt für den Zustart des Verbrennungsmotors deutlich erhöht ist. Im Sportmodus dagegen, wird der Elektromotor lediglich zum Boosten genutzt und Energie durch Bremsvorgänge rekuperiert.

Im realen Fahrversuch waren über die gesamte RDE Strecke war jedoch trotz der Lastpunktverschiebung zwischen Hybrid und dem maximal elektrischen Modus energetisch gesehen kaum Abweichungen messbar, da bei beiden Modi die komplette in der Batterie gespeicherte Energie verwendet wurde.

In der folgenden Grafik sind die Energieflüsse von und zur Hochvoltbatterie dargestellt.

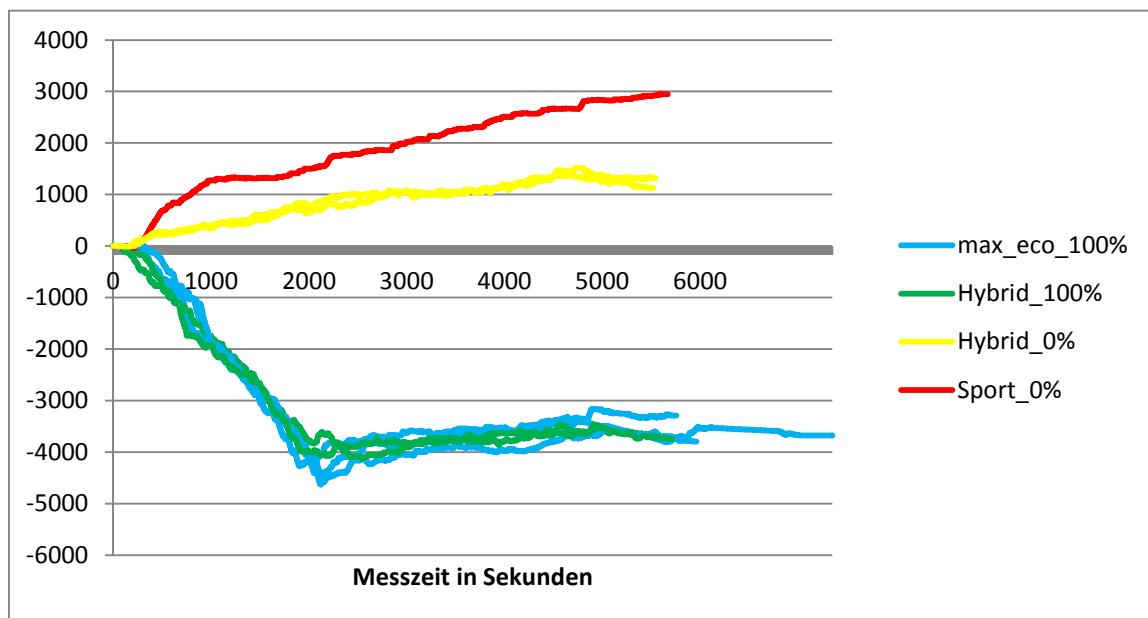


Abbildung 63: Mercedes C350e RDE HV-Energieverbrauch

Wie zu erkennen ist, ändert sich das energetische Verhalten je nach Fahrmodus und Ausgangsladezustand. Bei vollem Akku wurde unabhängig vom Fahrmodus von Beginn der Fahrt an Strom aus der Batterie gezogen und komplett elektrisch gefahren. In den Fällen mit einem niedrigen Batterie Ladezustand wurde bereits zu Beginn der Fahrt Strom in die

Hochvoltbatterie eingespeist. Dieser Effekt ist am deutlichsten an der Fahrt im Sportmodus zu sehen, wo über die komplette RDE-Fahrt 3 kWh nachgeladen wurden. Bei den Fahrten im Hybridmodus waren es dagegen nur rund 1,2 kWh. Da gegen Ende der Fahrt im Hybridmodus die Kurve abflacht, ist rückzuschließen, dass die Batterie nur bis zu einem gewissen Ladezustand nachgeladen hat und diesen dann gehalten hat. Diese Unterschiede verdeutlichen sich selbstverständlich auch im Kraftstoffverbrauch wie der folgenden Darstellung zu entnehmen ist.

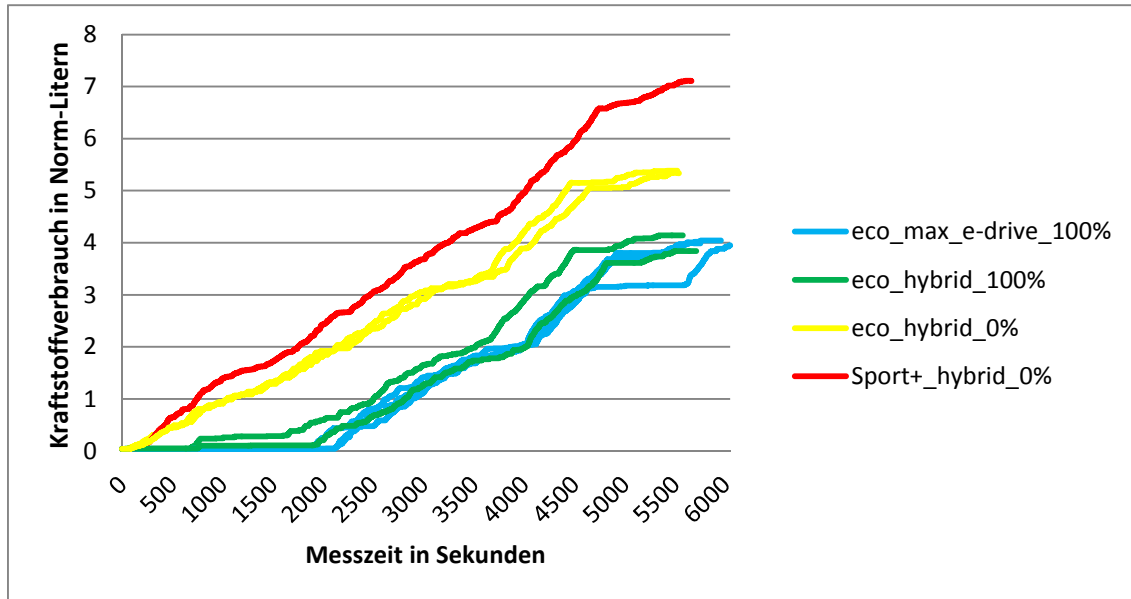


Abbildung 64: Mercedes C350e RDE-Kraftstoffverbrauch

In den Zuständen, in welchem die maximale Batterieenergie genutzt wurde, war ein Verbrauch von etwa 4 l für die gefahrenen 78 km messbar. In den beiden Fällen welche im Hybrid Modus mit leerer Batterie durchfahren wurden, waren es 5,2 l. Im Sportmodus mit leerer Batterie waren es dagegen um die 7 l Kraftstoff für die 78 km. Allerdings wurde in den letzten beiden Fällen elektrische Energie in die Batterie zurückgewonnen und gespeichert. Im Sportmodus lief der Verbrenner während der gesamten Fahrt, weshalb die elektrisch zurückgelegte Strecke 0 km ist (Abbildung 65).

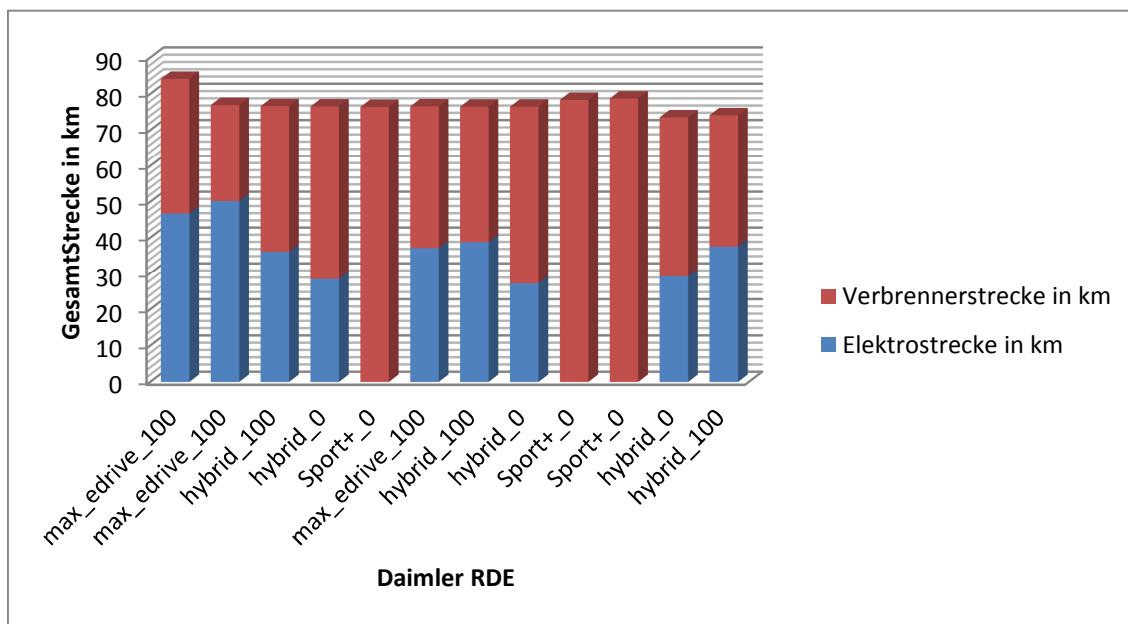


Abbildung 65: Mercedes C350e RDE-Streckenanteile

Im maximal elektrischen Modus waren in den RDE-Fahrten elektrische Reichweiten von 37-50 km möglich, was mehr ist als im Datenblatt angegeben. Dies ist unter anderem wahrscheinlich den Motorabschaltungen während der „Segelphasen“ geschuldet, welche zu den elektrischen Streckenanteilen zählen. Im Hybridmodus mit vollem Akku waren es dagegen „nur“ durchschnittlich 37 km elektrisch. Die auch recht hohen elektrischen Reichweiten im Hybrid-Modus mit leerem Akku von ca. 27 km entstanden höchstwahrscheinlich größtenteils ebenfalls durch „Segel“-Effekte.

Der rechnerisch kombinierte Verbrauch im RDE Betrieb mit der elektrischen Reichweite aus dem Datenblatt und dem Kraftstoffverbrauch während des RDE Zyklus führt zu Verbrauchswerten zwischen 4,2 l/100km und 6,6 l/100km.

Für den Mercedes wurden analog zum BMW die Fahrzeugkoeffizienten von der amerikanischen Umweltbehörde EPA verwendet, was zu einem erhöhten Verbrauch im Vergleich zu den Normzulassungswerten führt. Beim NEFZ waren die in Abbildung 66 dargestellten Werte erreichbar.

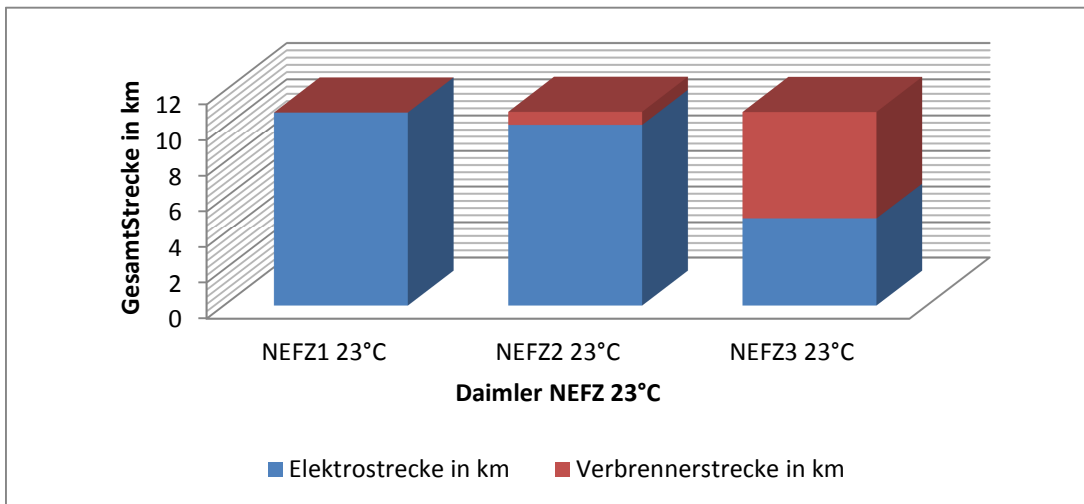


Abbildung 66: Mercedes C350e NEFZ 23°C Streckenanteile

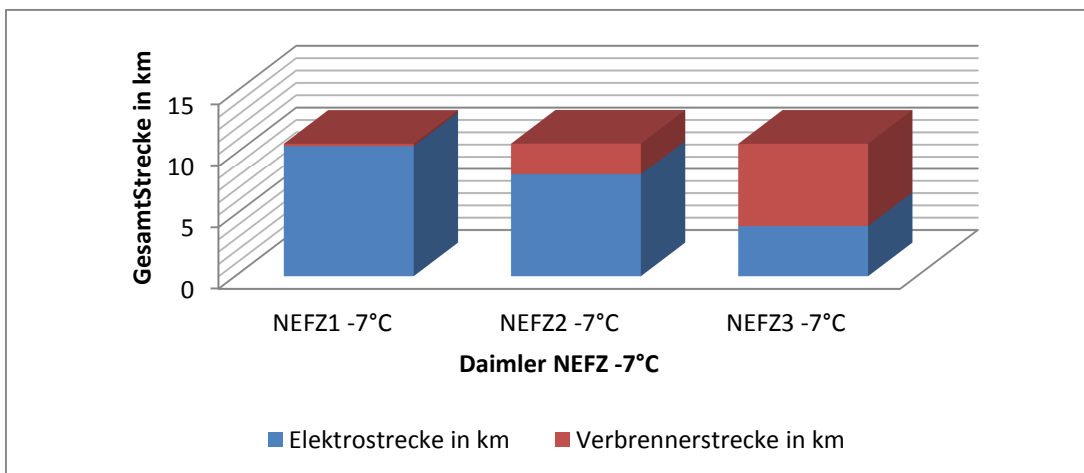


Abbildung 67: Mercedes C350e NEFZ-7°C Streckenanteile

Analog zum Golf GTE, konnte der Mercedes auch bei -7°C elektrisch starten. Bei 23°C ergab sich eine elektrische Reichweite von etwa 20 km und bei -7°C von 18 km. Die geringere Reichweite im Vergleich zu den Datenblattangaben kann unter anderem an den verwendeten Koeffizienten, aber auch an der kurzzeitig sehr hohen Lastanforderung beim Beschleunigen im zweiten Zyklus gelegen haben, sodass sich dort bereits der Verbrennungsmotor zuschaltete.

Beim WLTC waren um die 20 km elektrische Reichweite bei 23°C und 14 km bei -7°C messbar.

7.2.3 Nebenverbraucher

Alle im Fahrzeug vorhandenen Nebenverbraucher wie HV-Klimaanlage, HV-PTC-Heizer, Bordnetz etc., werden entweder aus dem 12 V Bordnetz oder aus dem Hochvoltnetz versorgt. Im Gegensatz zu einem konventionellen Fahrzeug, in welchem das 12V Bordnetz über die Lichtmaschine geladen wird, wird bei den im Projekt vorhandenen Fahrzeugen das 12V Netz von dem Hochvoltnetz über einen Wandler in der Leistungselektronik versorgt.

In den Fällen, wenn die Hochvoltbatterie leer ist, wird der Elektromotor als Generator verwendet, sodass gewährleistet ist, dass alle Systeme mit Strom versorgt werden.

Die Nebenverbraucher aus dem 12V Netz unterscheiden sich kaum im Vergleich zu denen herkömmlicher Verbrennungsfahrzeuge, da der energetische Verbrauch im Vergleich zu denen des Hochvoltnetzes vergleichbar gering ist. Aus diesem Grund werden diese keiner genaueren Betrachtung unterzogen.

Zu den Hochvoltnebenverbrauchern zählen der elektrische Klimakompressor und der PTC-Heizer. Deren Einsatz und somit die Auswirkung auf die Gesamthochvoltbilanz des Fahrzeuges ist allerdings stark Nutzerabhängig und variiert je nach Außentemperatur und Komfortbedarf. Es gibt in zweien der Fahrzeuge die Möglichkeit, eine vertiefte Einstellung für den „Fahrerkomfort“ einzustellen. Diese Einstellung wirkt sich ebenfalls auf den elektrischen Verbrauch der Hochvolt-Klimatisierungskomponenten aus.

Demzufolge entscheidet nicht nur die nutzerbedingte Einstellung in diesem Menü, sondern ebenfalls die äußeren Umgebungsbedingungen über den Einsatz und somit den Anteil am Gesamtenergiebedarf der Nebenverbraucher. Der Großteil der durchgeführten RDE-Fahrten, wurde bei Außentemperaturen zwischen 15°C und 28°C durchgeführt, sodass der Energiebedarf für die Klimatisierung bei den durchgeführten RDE-Fahrten entsprechend gering ausfiel. Anders ist dies natürlich, sobald die Außentemperatur stark von der „normalen“ Temperatur abweicht. Dies ließ sich bei entsprechenden Versuchen im Winter bei Minustemperaturen oder auch bei extrem hohen Außentemperaturen im Sommer ermitteln. Gerade bei einem niedrigen Akkustand, muss der Motor entsprechend mehr Energie erzeugen, um über die Wirkungsgradverluste des Generators und der Leistungselektronik die Fahrgaskabine beispielsweise zu erwärmen oder zu kühlen. Bei einem herkömmlichen Verbrenner würde dies quasi automatisch über die Abwärme mit geschehen, sodass abgesehen von der Auswärmphase des Motors keine höhere Last benötigt werden würde.

Bei den Normtests am Rollenprüfstand ist dagegen gesetzlich vorgeschrieben, dass die Nebenverbraucher ausgeschaltet sein müssen, um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Fahrzeugen gewährleisten zu können.

Ebenfalls soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass auch der Ladewirkungsgrad nicht unbedeutend für die Energiebilanz eines Fahrzeuges darstellt. Um diesen Messen zu können, wurde an einer entsprechenden Steckdose der entnommene Strom gemessen und der Strom, welcher in die Hochvoltbatterie geflossen ist. Dabei war bei allen Fahrzeugen ein Ladewirkungsgrad von etwa 85% festzustellen. Je nach „Restwärme“ der elektrischen Komponenten, so muss beim Laden beispielsweise die Leistungselektronik gekühlt werden und durch die Kabellängen zwischen Ladeeinheit im Fahrzeug und Batterie geht ebenfalls ein Teil verloren.

8 Schlussfolgerungen

Das Hauptziel des Projektes war die Beantwortung der Frage, wie sich Hybridfahrzeuge im Real-Drive-Test verhalten, dies hauptsächlich bzgl. der Emissionen NO_x , CO_2 und Feinstaub. Die Herausforderung bei der Beantwortung der Frage stellt sich in der Bewältigung der großen Komplexität der Gesetzgebung auf der einen Seite, die sich im Zeitverlauf des Projektes auch änderte, und der Vergleichbarkeit bzgl. der Reproduzierbarkeit von Messfahrten auf der Straße.

Jedes Hybridfahrzeug lässt sich in unterschiedlichen Betriebsmodi fahren, jedes Fahrzeug hat ein anderes Betriebsverhalten. Deshalb wurden in dieser Studie drei unterschiedliche Fahrzeuge gewählt und deren Emissionsverhalten auf der RDE-Strecke in ihren jeweiligen Betriebsmodi gemessen. Die Problematik des direkten Vergleichs der Messungen besteht zusätzlich in der Reproduzierbarkeit der RDE-Zyklen danach auf dem Prüfstand (zur Überprüfung auch bei anderen Umgebungstemperaturen), da jede RDE-Fahrt naturgemäß einen anderen Geschwindigkeitsverlauf hat.

Die gemessenen Partikelemissionswerte waren zum Zeitpunkt der Fahrzeugzulassungen innerhalb der Grenzwerte (Bezugsgröße war NEFZ, Euro 6), die momentan geltenden niedrigeren Euro 6 d temp-Grenzwerte werden aufgrund des fehlenden Partikelfilters häufig überschritten.

Die NO_x -Emissionen liegen in einigen Situationen über den WLTC-Grenzwerten (Euro 6d), schwerpunktmäßig, wenn trotz bei Fahrbeginn vollgeladener Batterie der Verbrennungsmotor bei niedrigen Temperaturen (-7°C) und hoher Last (Autobahn) zu- bzw. eingeschaltet wird.

Die in dieser Studie vorgestellten Tests zeigen, dass der CO_2 -Ausstoß direkt mit dem Fahrmodus und dem Batterie-SOC der PHEV korreliert. Für alle Fahrzeuge ist die Hybridisierung in Bezug auf geringere CO_2 -Emissionen sowohl in RDE- als auch in WLTP-Tests vorteilhaft, obwohl unterschiedliche Strategien des Hybridfahrverhaltens und die resultierenden Kraftstoffeinsparpotenziale beobachtet werden können. Bei den CO -, NO_x - und Partikelemissionen besteht jedoch kein solcher Zusammenhang. Für diese Schadstoffe hängen die Konzentration im Abgasstrom und die absoluten Emissionen von den Fahrbedingungen ab, in denen der Verbrennungsmotor startet. Wenn der Verbrennungsmotor bei hoher Last und hoher Geschwindigkeit startet, steigen die Emissionen erheblich. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn das PHEV bei niedrigen Umgebungstemperaturen betrieben wird. Aufgrund der niedrigen Katalysatortemperatur werden CO und NO_x in solchen Fällen nicht reduziert. Der Test zeigt z.B. beim BMW 333e bei einer Umgebungstemperatur von -7°C eine andere Betriebsstrategie und Emissionsbildung als die Messungen bei moderaten Temperaturen. Der elektrische Fahranteil kann diese hohen Emissionen innerhalb der getesteten Zyklen nicht in allen Fällen kompensieren.

Es sind verschiedene technische Maßnahmen möglich, um diesen Problematiken zu begegnen. Neben der Einführung von Partikelfiltern für Benzinfahrzeuge spielt die Betriebsstrategie der PHEVs eine große Rolle. Hohe Kaltstartemissionen könnten beispielsweise durch Anpassung der Lastverteilung während der Kaltstartphase oder beispielsweise durch eine elektrische Vorwärmung des Katalysatorsystems vermieden werden. Es werden nicht alle Eventualitäten zu hundert Prozent abdeckbar sein, wenn es bzgl. der Wiederstartvor-

gänge des Verbrennungsmotors einer Vorheizung von Kühlkreislauf oder Katalysator bedürfte.

Im Allgemeinen zeigen die Emissionsmessungen in realen Fahrstrecken eine höhere Varianz im Vergleich zu Prüfstandtests. Im Fall von PHEVs ist dieser Effekt aufgrund unterschiedlicher Wahl der Fahrbetriebsarten, unterschiedlichen Ladeverhaltens der Benutzer, der erforderlichen elektrischen Kilometerleistung und der Hybridfahrstrategie des Fahrzeugs verstärkt, da es während des elektrischen Fahrens zu Motor-Kaltstarts (auch bei hohen Motorlasten) führt. Darüber hinaus beeinflusst die Umgebungstemperatur die elektrische Reichweite und die Kaltstartemissionen. Bei einer niedrigen Außentemperatur sinkt aufgrund des verringerten Energiegehalts der Batterie die elektrische Reichweite. Die Varianz dieser Parameter erschwert die Abschätzung der Emissionsvorteile von PHEVs.

Die normkonformen RDE-Messungen können nicht die Vorteile der PHEV vollständig widerspiegeln und sind nicht repräsentativ für (vorgesehene) PHEV-Nutzerprofile (s.a. § 3.2). Zusätzliche Daten zur tatsächlichen Nutzung von PHEV sind erforderlich, um die potenziellen Vorteile zu bewerten, und es sind weitere technische Maßnahmen erforderlich, um das volle Potenzial der Emissionsreduzierung dieses Fahrzeugtyps auszuschöpfen.

Ebenso sind die tatsächlichen Einflüsse verschiedener Umgebungstemperaturen, wie sie im Winter oder Sommer in Deutschland vorherrschen, auf die energetisch gesehen prozentuale Verteilung zwischen elektrischem Antrieb und Hochvolt-Nebenverbrauchern noch nicht genauer untersucht wurden. Eine durch die Nebenverbraucher möglicherweise stark reduzierte elektrische Reichweite führt zwangsweise zu höheren Emissionen.

Eine ebenfalls tiefgründiger zu untersuchende Hybridfunktion stellt das rekuperative Bremsen da. Durch dieses kann nicht nur Energie in die Batterie zurückgewonnen werden, es werden ebenso die Abnutzungen der Bremsklötze und Bremsscheibe vermindert, was gesamtfahrzeugtechnisch gesehen zu einer geringeren Partikelemission führt. Diese Bremspartikel sind zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht legislativ mit einem Grenzwert geregelt, sodass hier noch keine Verbesserung im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug gemessen wird.

9 Referenzen

1. European Commission: Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen. (2014)
2. Viehmann, S.: Rechnung zeigt wahren Grund, warum deutsche Hersteller Elektroautos brauchen, https://www.focus.de/auto/elektroauto/strafen-in-milliardenhoehe-drohen-deutsche-autobauer-muessen-bis-2023-mehr-als-500-000-e-autos-auf-die-strassen-bringen_id_8058030.html, (2017)
3. European Commission: Commission Regulation (EU) 2017/1154 of 7 June 2017 amending Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Regulation (EC) No 692/2008 and Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council as regards real-driving emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6). (2017)
4. Pontes, J.: Tracking plug-in car sales all over the world, <https://ev-sales.blogspot.com/search/label/Germany>, (2016)
5. emma Projekt: emma - e-mobil mit anschluss - Elektromobilität in der Region Bodensee-Oberschwaben, <https://www.emobil-im-sueden.de/emma-ladestationen.html>, (2016)
6. Mitsubishi Motors: Der neue Outlander Plug-in Hybrid, <https://www.mitsubishi-motors.de/outlander-plug-in-hybrid/#!details-und-daten/tech-spec/2-0-mivec-4wd>, (2016)
7. Frisch und Fischl GmbH: Spritmonitor, www.spritmonitor.de, (2016)
8. AIP Automotive: Portable Emissions Measurement System, https://www.aip-automotive.de/portals/0/PDF/Handout_PEMS_A5_EN_v6.pdf, (2015)
9. Kaal, B.: Phänomenologische Modellierung der stationären und transienten Stickoxidemissionen am Dieselmotor. Springer Fachmedien, Wiesbaden (2017)
10. Testa GmbH: Testa FID Informations-Center, <https://www.testa-fid.de/index.php?id=infocenter>, (2018)
11. Huber, J.: Photoakustischer Low-Cost CO₂-Sensor für Automobilanwendungen. In: Automobil-Sensorik. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg (2016)
12. Bischof, O.F., Horn, H.-G.: Zwei Online-Messkonzepte zur physikalischen Charakterisierung ultrafeiner Partikel in Motorabgasen am Beispiel von Diesemissionen, (1999)

Anhang A: CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen von zwei beispielhaften RDE Tests des VW Golf GTE

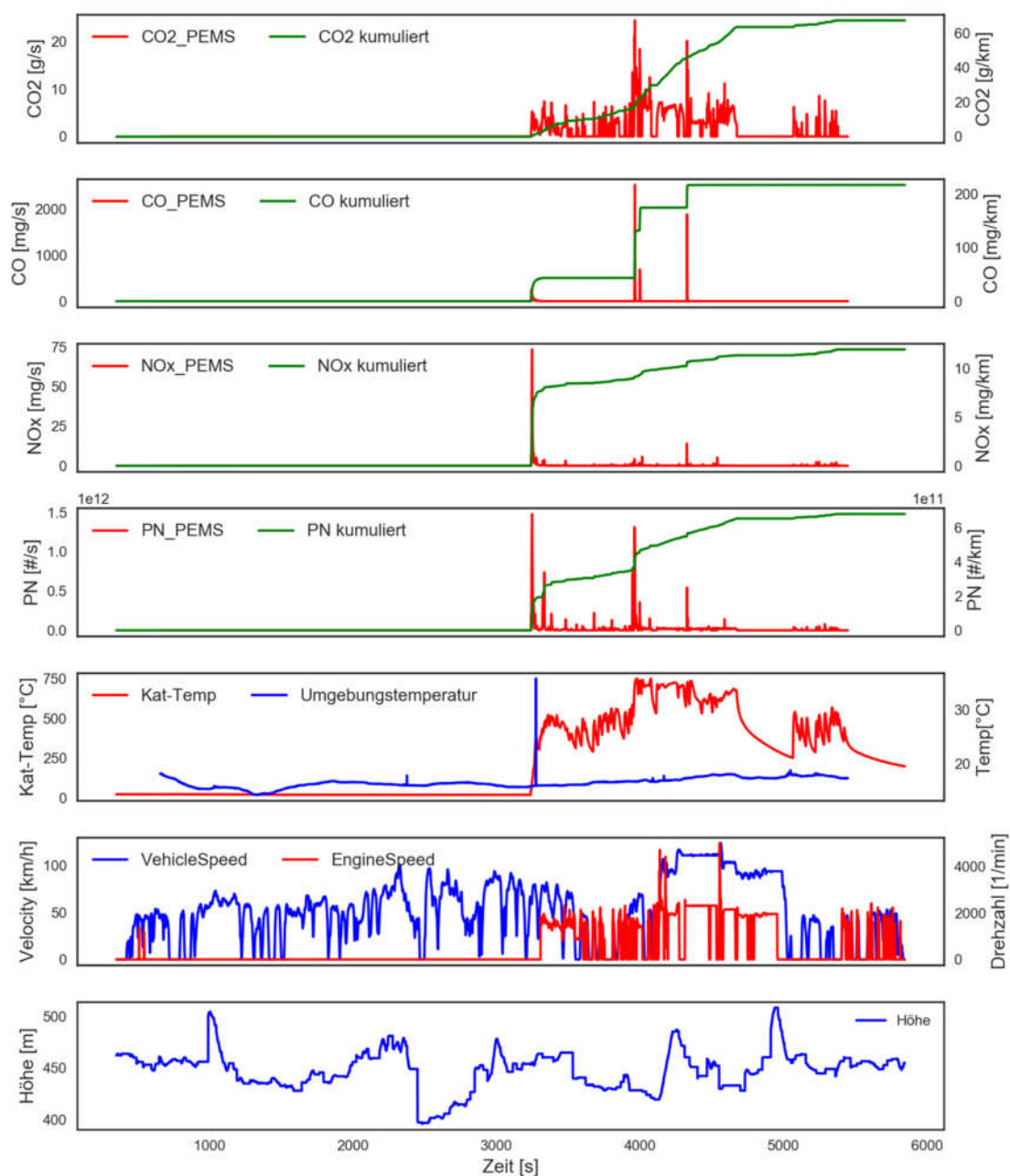


Abbildung A1: Fahrmodus: Eco-Mode; SOC = 100% bei Teststart

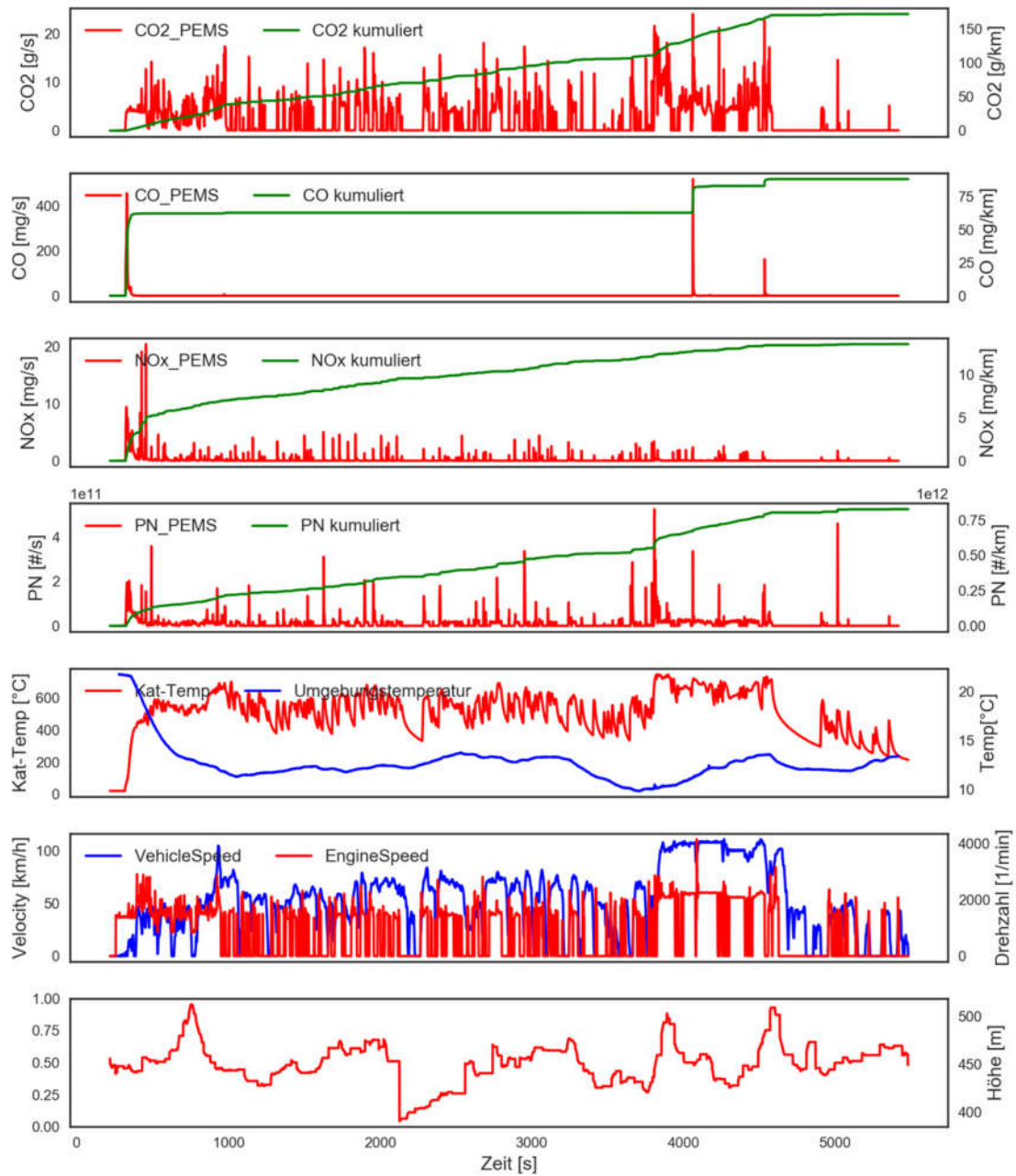


Abbildung A2: Fahrmodus: Hybrid; SOC = 0% bei Teststart

Anhang B: CO₂, CO, NO_x und PN Emissionen von zwei beispielhaften RDE Tests des Mercedes C350e

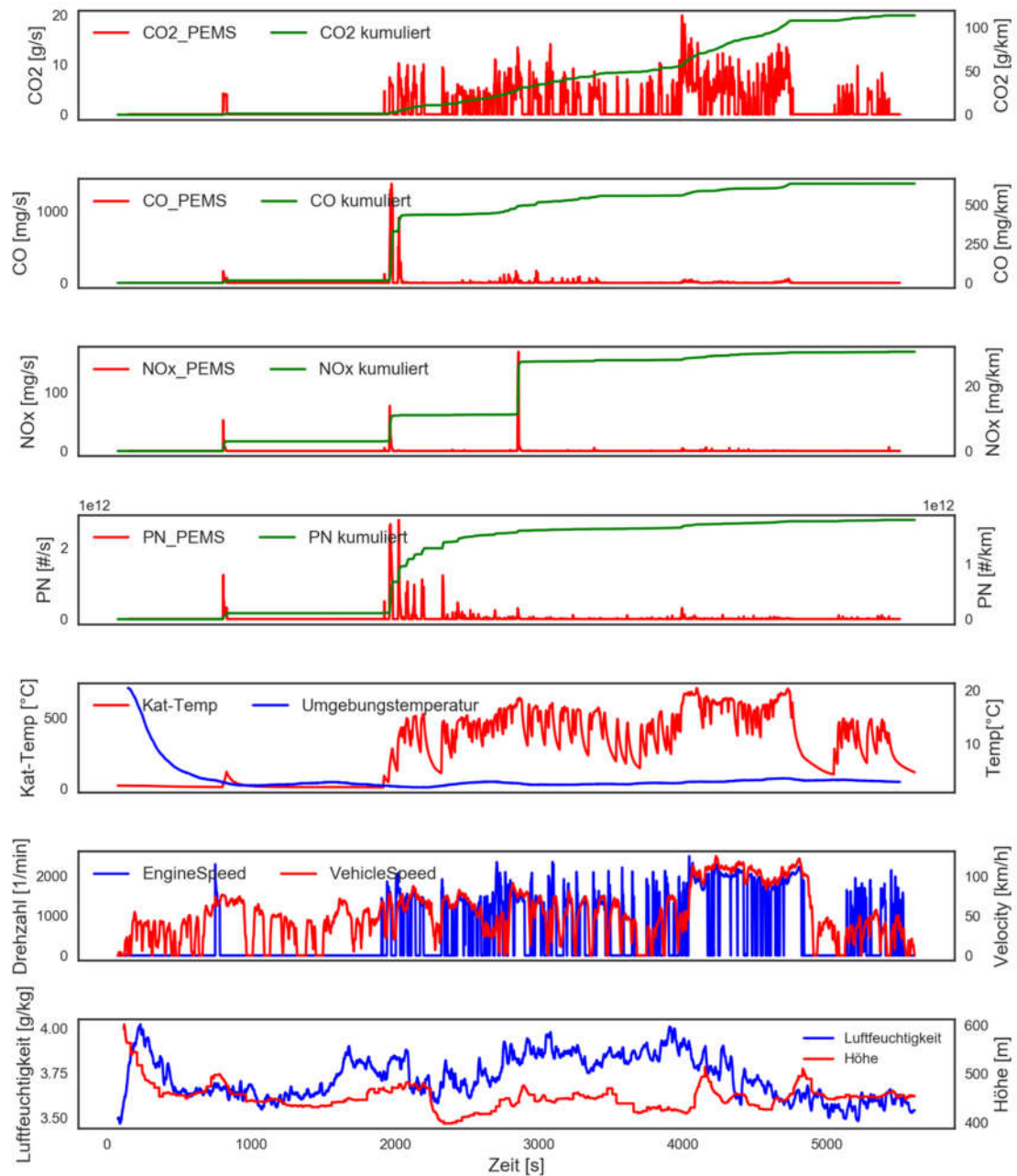


Abbildung B1: Fahrmodus: Eco-Mode; SOC = 100% bei Teststart

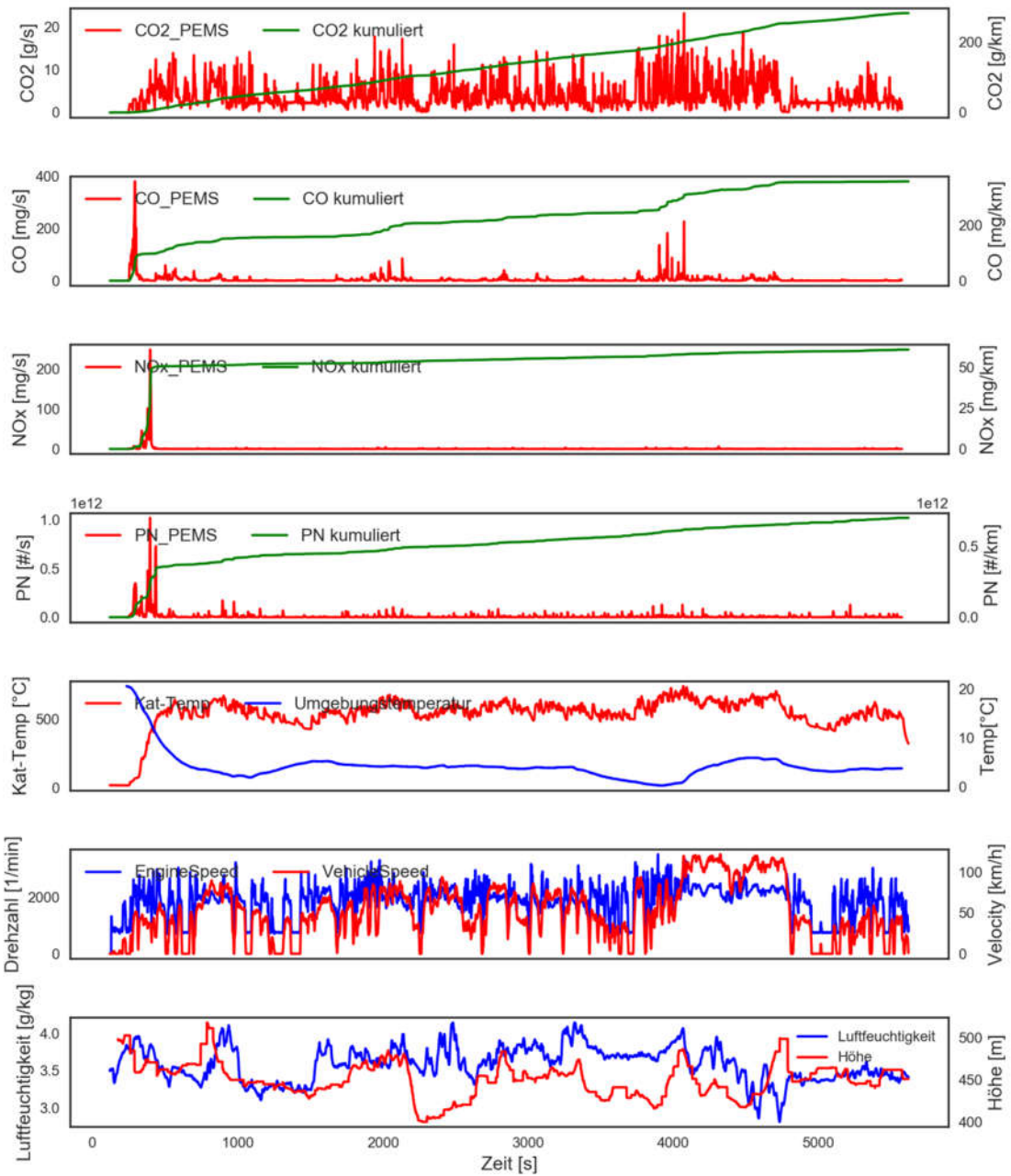


Abbildung B2: Fahrmodus: Sport; SOC = 0% bei Teststart