

On-Board-Abgasmessungen an Dieselfahrzeugen im Stuttgarter Straßenverkehr

Projekt der LUBW mit **TÜV NORD**

Dr. Werner Scholz, LUBW Karlsruhe, Referat 33 - Luftqualität

Martin Kleinebrahm, TÜV NORD Mobilität, Essen

Heinz Steven, Datenanalysen und Gutachten, Heinsberg

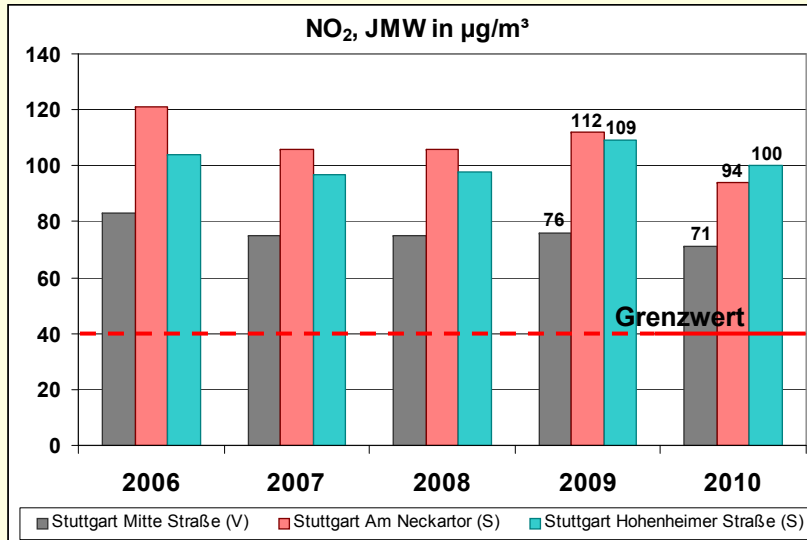


Baden-Württemberg

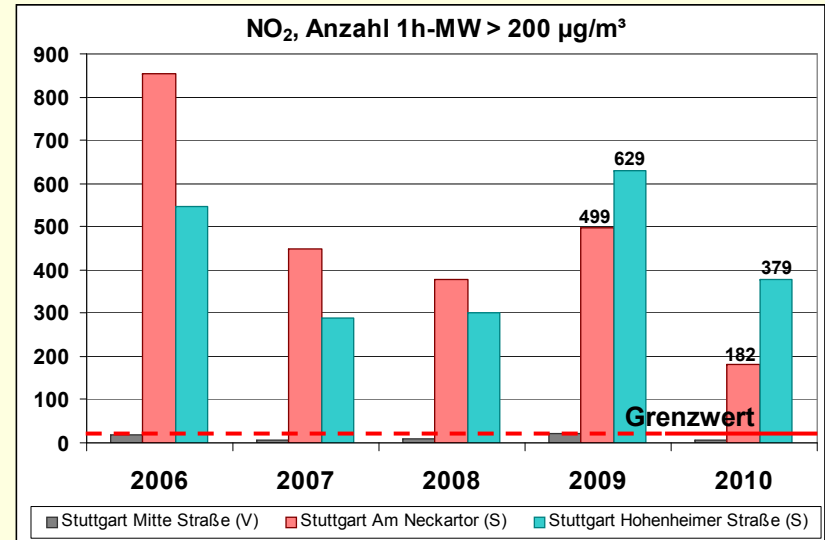
Immissionssituation in Stuttgart

- Massive Grenzwertüberschreitungen bei NO₂ an den stark verkehrsbelasteten Stationen

- **NO₂-Jahresmittelwert**



- **NO₂ Anzahl Std. > 200 µg/m³**



- **Am Neckartor:** DTV 72.000, Lkw-Anteil 4,4% → Steigung 0%
- **Hohenheimer Straße:** DTV 30.000, Lkw-Anteil ~ 1% → Steigung 6,7%!
- Stuttgart besitzt anspruchsvolle Topographie mit erheblichen Steigungen
- Zusätzlich durch Kessellage lufthygienisch ungünstige Bedingungen
- Ursachen insbesondere der NO₂-Spitzenbelastungen unklar

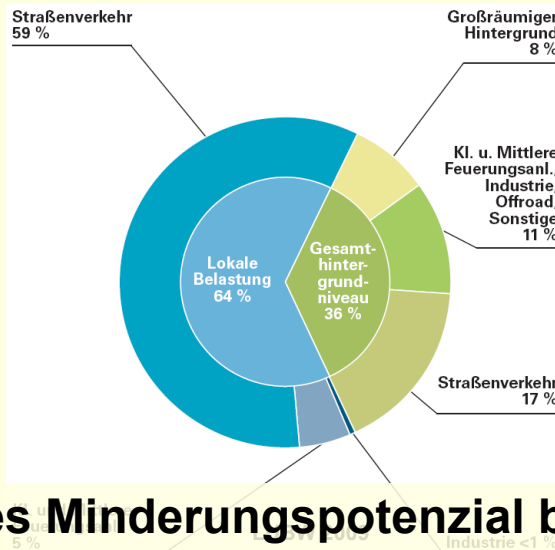
Emissionssituation in Stuttgart

Ursachenanalyse NO₂, Beitrag des Straßenverkehrs:

■ Am Neckartor:

lokal: 59%, HG: 17%

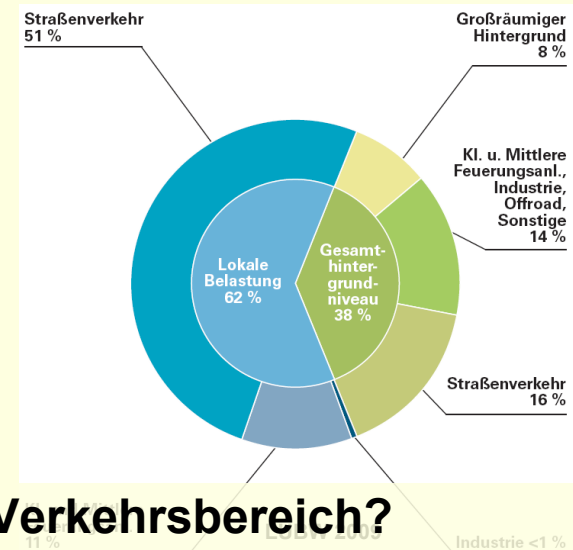
→ **Summe 76%**



■ Hohenheimer Straße:

lokal: 51%, HG: 16%

→ **Summe 67%**



- **Welches Minderungspotenzial besteht im Verkehrsbereich?**
- **In Stuttgart wird Tempo 40 auf Hauptverkehrsstraßen diskutiert**
- **Führt ein Tempolimit zu einer Emissionsminderung der Fahrzeuge?**
- **Geeignete Emissionsfaktoren fehlen im HBEFA 3.1**
- **Versuche von P. Rabl, Bay. LfU, zu T50 ↔ T30 mit u. ohne Vorfahrt aus 2003!**

Projekt der LUBW mit TÜV Nord

➡ On-Board-Abgasmessungen an Dieselfahrzeugen im Stuttgarter Straßenverkehr

Projektfragestellungen:

- Analyse der **Abgaszusammensetzung** von Pkw im realen Stadtverkehr
- **Fahrzustände** mit hohen NO₂- und NO_x-Emissionen identifizieren
- Untersuchung der **Maßnahme Tempolimit** (T50 → T30, T50 → T40)
- Lastabhängigkeit der Emissionen an **Steigungstrecken**
- Einfluss von **Verkehrsverstetigung** auf die Emissionen
- **Hinweise auf Emissionsminderungspotenzial** sollen resultieren

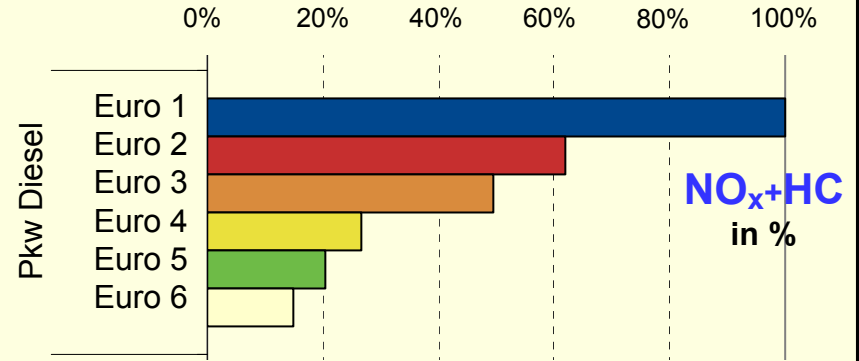
➡ Warum Diesel-Kfz?

Abgasgrenzwerte und Emission im realen Betrieb

EU-Abgas-grenzwerte für Diesel-Pkw

$\text{NO}_x + \text{HC}$

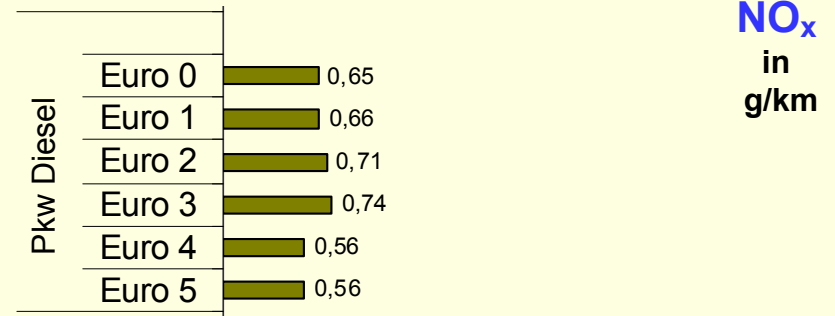
Pkw Diesel	
NO_x	$\text{HC} + \text{NO}_x$
[g/km]	
-	1,13
-	0,7
0,5	0,56
0,25	0,3
0,18	0,23
0,08	0,17



HBEFA 3.1

NO_x

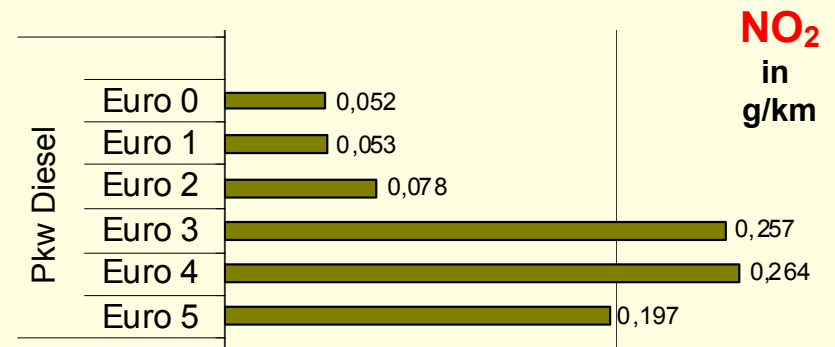
Ø innerorts
Bezugsjahr 2010



HBEFA 3.1

NO_2

Ø innerorts
Bezugsjahr 2010

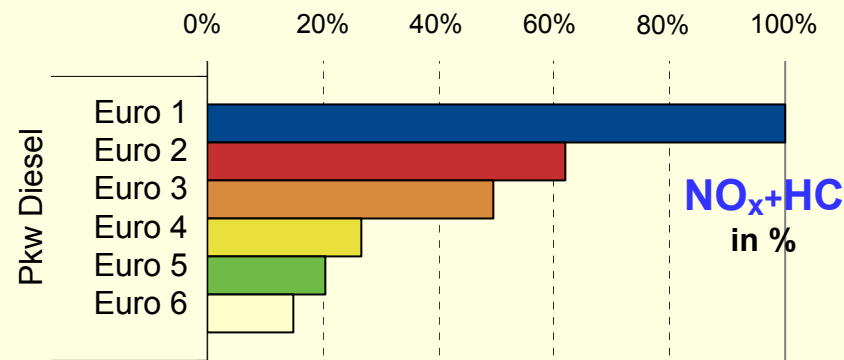


Abgasgrenzwerte und Emission im realen Betrieb

EU-Abgas-grenzwerte für Diesel-Pkw

NO_x+HC

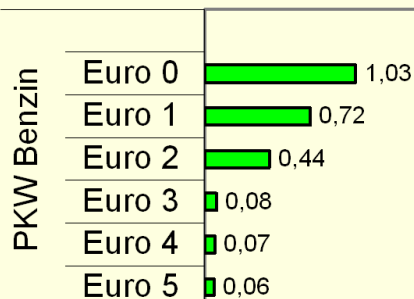
Pkw Diesel	
NO _x	HC+NO _x
[g/km]	
-	1,13
-	0,7
0,5	0,56
0,25	0,3
0,18	0,23
0,08	0,17



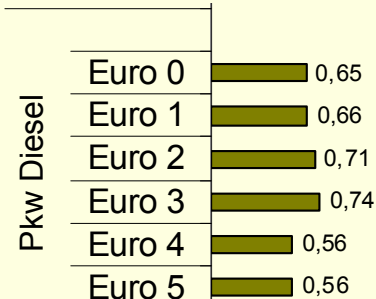
HBEFA 3.1

NO_x

Ø innerorts



Pkw Benzin

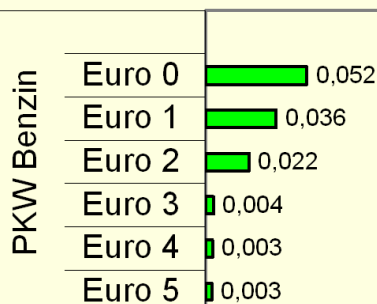


NO_x
in
g/km

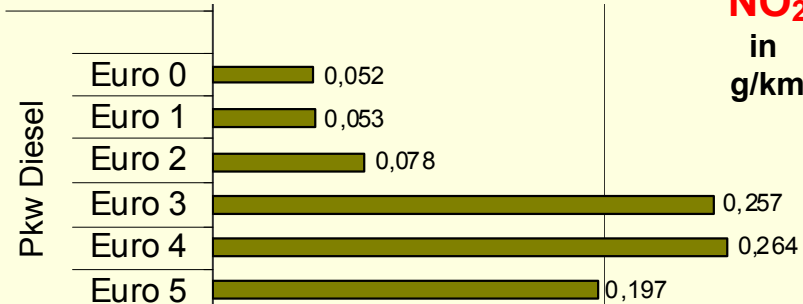
HBEFA 3.1

NO₂

Ø innerorts



Pkw Benzin



NO₂
in
g/km

Fahrzeugauswahl

- | | | |
|---|----------------|------------|
| 1 Diesel-Pkw der unteren Mittelklasse | 1,6 l / 77 kW | EU-4 + DPF |
| 1 Diesel-Pkw der gehobenen Mittelklasse | 2,2 l / 125 kW | EU-4 + DPF |
| 1 leichtes Nutzfahrzeug | 3,0 l / 140 kW | EU-4 + DPF |
- **Modelle sind repräsentativ** für die Kfz-Flotte in Stuttgart (relevante Anteile)
- Gewählt wurde **Abgasstufe Euro 4 + DPF**:
Bei Diesel-Pkw **höchster Flotten- und Fahrleistungsanteil** (HBEFA 2010)
Bei LNFz **zweithöchster Flotten- und Fahrleistungsanteil** nach Euro 3
- Das **leichte Nutzfahrzeugmodell** wird fast ausschließlich **mit DPF** ausgeliefert
- Fokus der Untersuchung auf **Stickoxidemissionen**
Messungen der **Partikelemission** werden nicht durchgeführt
Aussagen zu Partikeln über **PHEM-Modellierung**

Kenndaten der Versuchsfahrzeuge

Fahrzeugtyp	Gehobene Mittelklasse	Leichtes Nutzfahrzeug	Untere Mittelklasse
Antriebsart	Dieselmotor	Dieselmotor	Dieselmotor
Nennleistung	125 kW / 3800 rpm	135 kW / 3800 rpm	103 kW / 4000 rpm
Erstzulassung	07 / 2006	12 / 2008	10 / 2006
Kilometerstand	72.500 km	18.300 km	129.000 km
Hubraum	2149 ccm	2987 ccm	1968 ccm
Schadstoffstufe	Euro 4 mit DPF	Euro 4 mit DPF	Euro 4 mit DPF
Masse (Testzustand)	2220 kg	3230 kg	1750 kg
Bemerkungen	Automatikgetriebe, zwei Schaltprogramme (Comfort und Sport)	Automatikgetriebe, nur ein Schaltprogramm	Handschalter, 6-Gang



Fahrzeug 1



Fahrzeug 2



Fahrzeug 3

Zuladung mit 2 Personen, Messgeräten und Generator: **ca. 300 kg**

Aufgrund der kleinen Stichprobe **Anonymisierung der Fahrzeugmodelle**

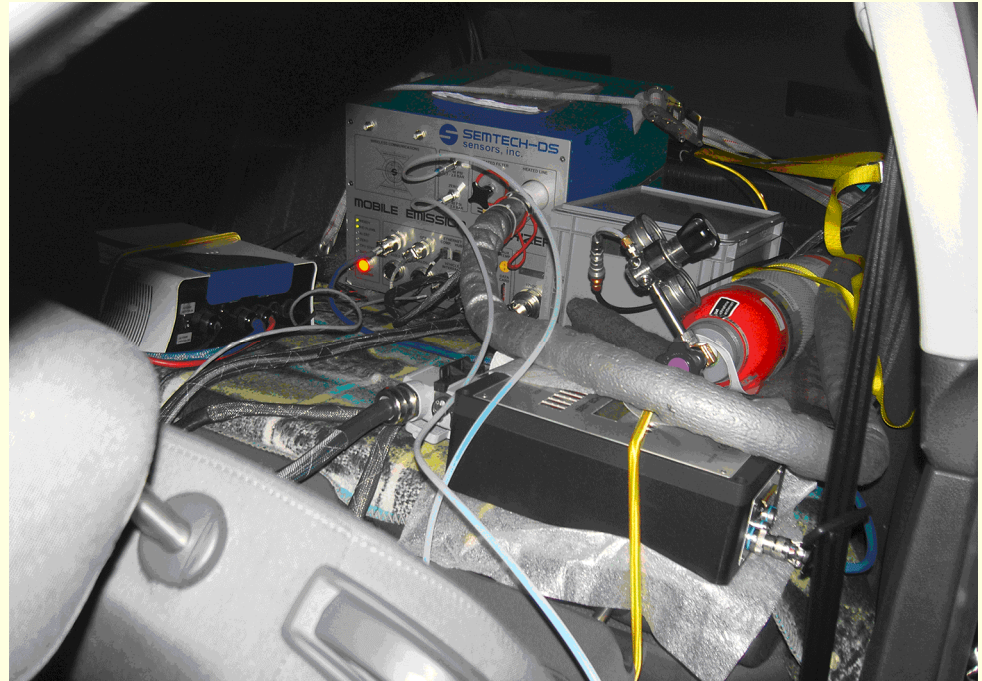
Versuchsdurchführung

- **Ausrüstung der Fahrzeuge mit PEMS-Analytik**
PEMS = Portable Emission Measurement System
 - Messrohr zur Erfassung des Abgasmassenstromes
 - Beheizte Zuleitung zur Analytik
 - Generator für Stromversorgung unabhängig vom Bordnetz
- **Möglichst häufige Messfahrten auf festgelegten Strecken** (statistische Absicherung)
- **Hauptverkehrsstraßen mit und ohne Steigung, Wohngebiete**
- **Höchstgeschwindigkeiten auf HVS** 50 km/h / 40 km/h / 30 km/h
→ **Messung von Effekten am einzelnen Fahrzeug, keine Netzeffekte**
- **Genehmigung der Straßenverkehrsbehörde**
zur praxisnahen Erforschung der Emissionen "aus triftigem Grund" nach § 3 Abs. 2 StVO
- **6 Messtage in Stuttgart, 1 Messtag in Freiberg a.N.**
- **zusätzlich Modellierung mit Emissionsmodell PHEM der Uni Graz**

Ausrüstung der Versuchsfahrzeuge



Messfahrzeug mit Generator, Abgasmessrohr und beheizter Leitung zur Analytik



Messtechnik im Fahrzeug

Auflagen der Straßenverkehrsbehörde:

- **rot-weiße Warnmarkierungen** vorn und hinten
- Schrifttafel "**Emissionsmessungen**" am Heck
- gelbes Blinklicht (**Rundumlicht**) während der Langsamfahrt

Eingesetzte Messtechnik bei den PEMS-Messungen

- Messung des Abgasmassenstroms mit **Electronic Flow Meter**, Firma **Sensors**

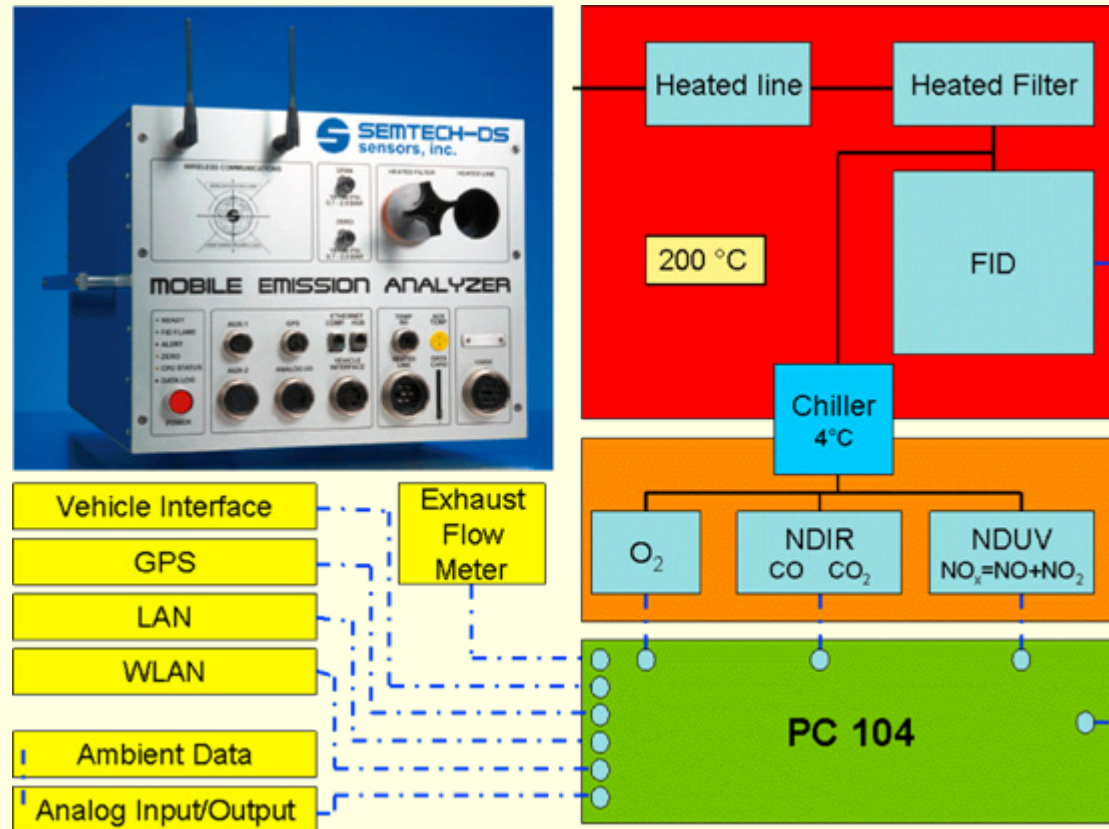
Messung der durchströmenden Masse
über den dynamischen Staudruck
(Pitot-Rohr Prinzip)



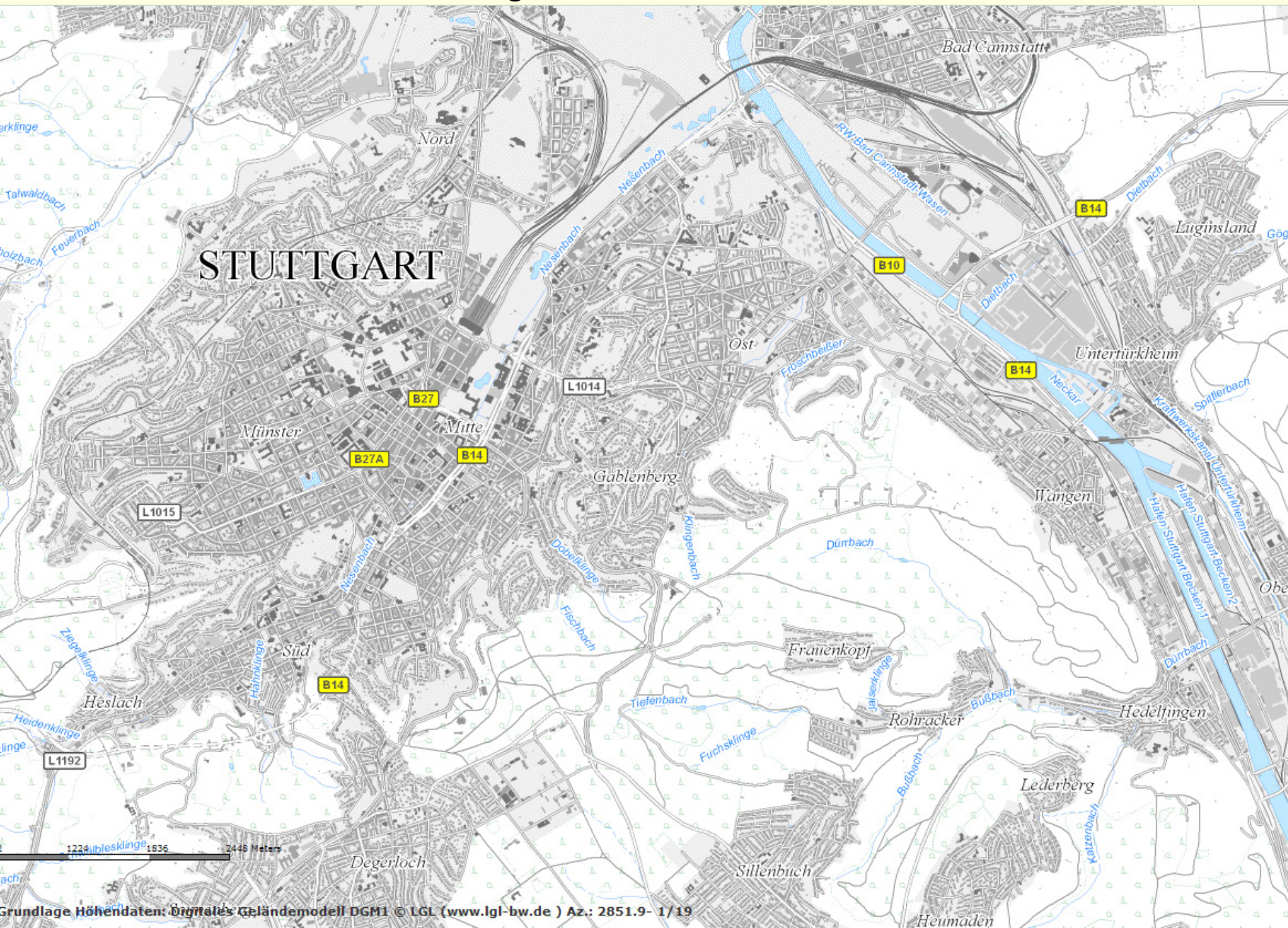
- Beheizte Zuleitung zur Analytik
- Messung der gasförmigen Komponenten mit **SEMTECH-DS**, Firma **Sensors**
- Motordrehzahl, Motorlast, Geschwindigkeit u.a. über OBD Schnittstelle
Erfassung der Fahrzeugposition über GPS (→ v)
Höhenkoordinaten anschließend über das DGM1 der LUBW zugeordnet
Erfassung von Temperatur, Luftdruck, Feuchte
- Erfassung von NO, NO₂, CO, CO₂ und HC im Sekundentakt
- Insgesamt über 300 Einfahrten ausgewertet und in Datenbank überführt

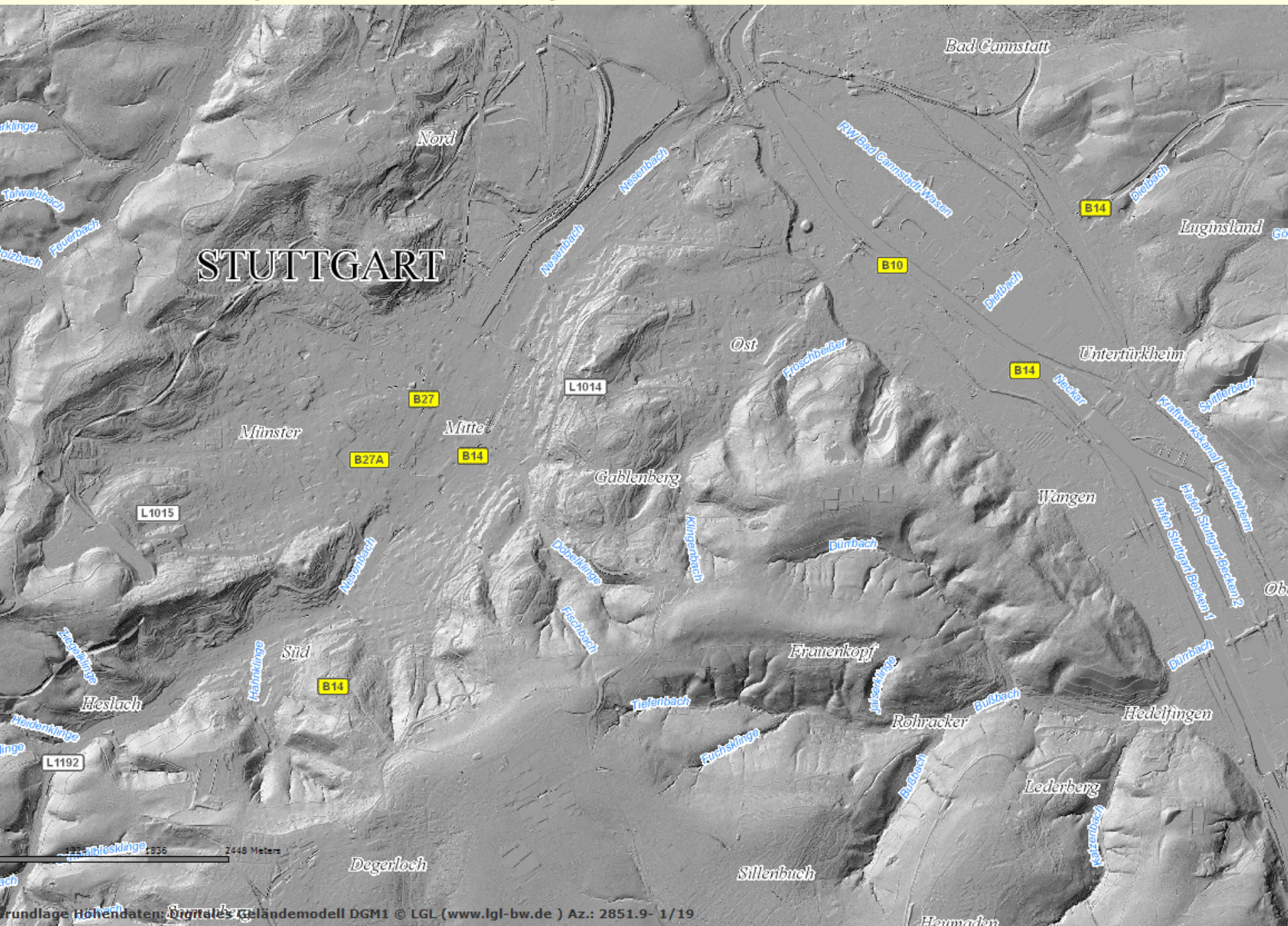
Messung der gasförmigen Komponenten mit SEMTECH-DS

- Messung von HC bei $> 180^{\circ}\text{C}$ mit FID. Nach Kühlung und Trocknung:
- CO- und CO₂-Bestimmung mit NDIR-Analysator (Nicht-Dispersiver-Infrarot-Analysator)
- NO- und NO₂-Bestimmung mit NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolett-Messbank)
- Zusammenführung der internen und externen Daten in angeschlossenem Rechner



Messsystem Semtech-DS und grundsätzlicher Systemaufbau

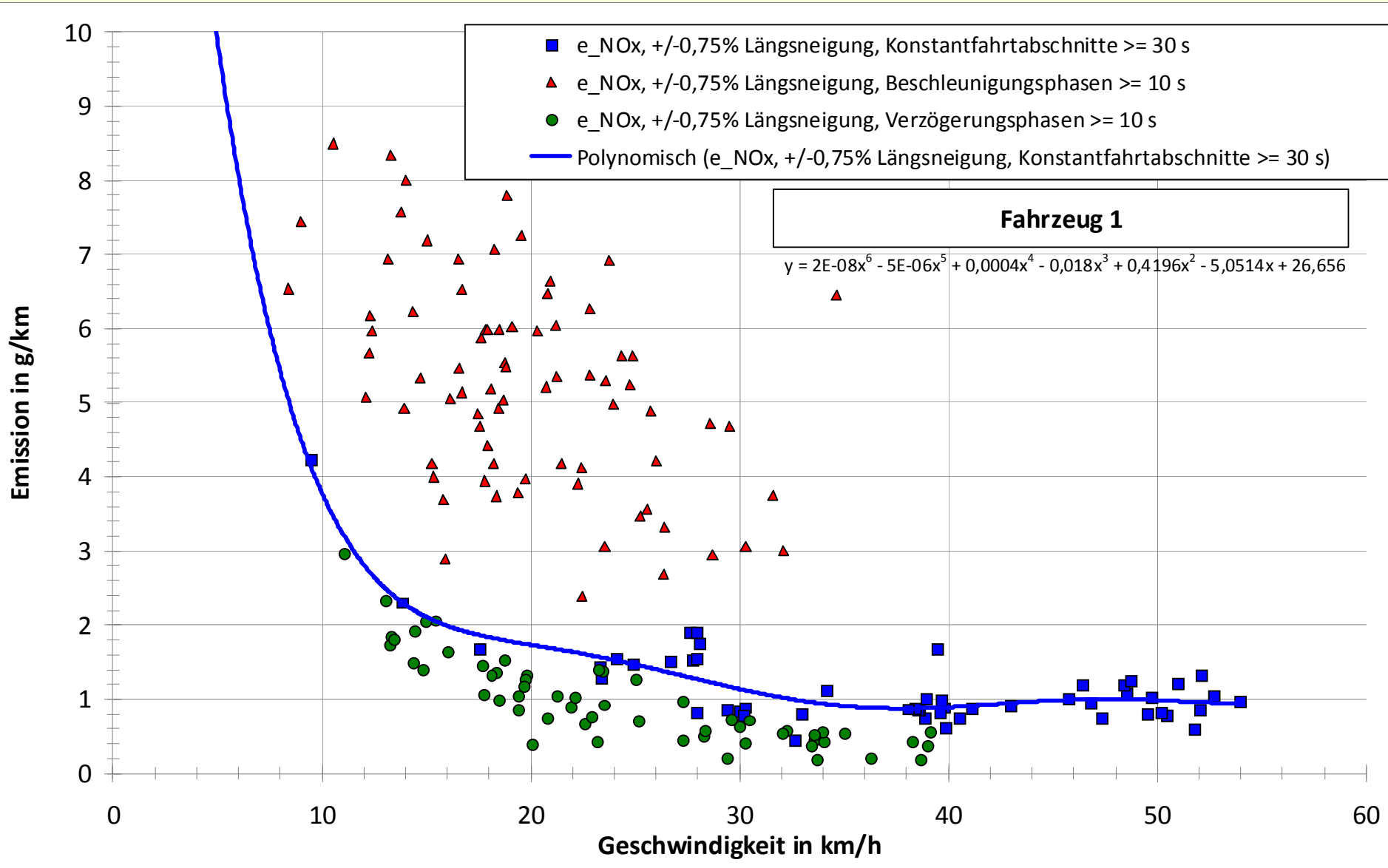




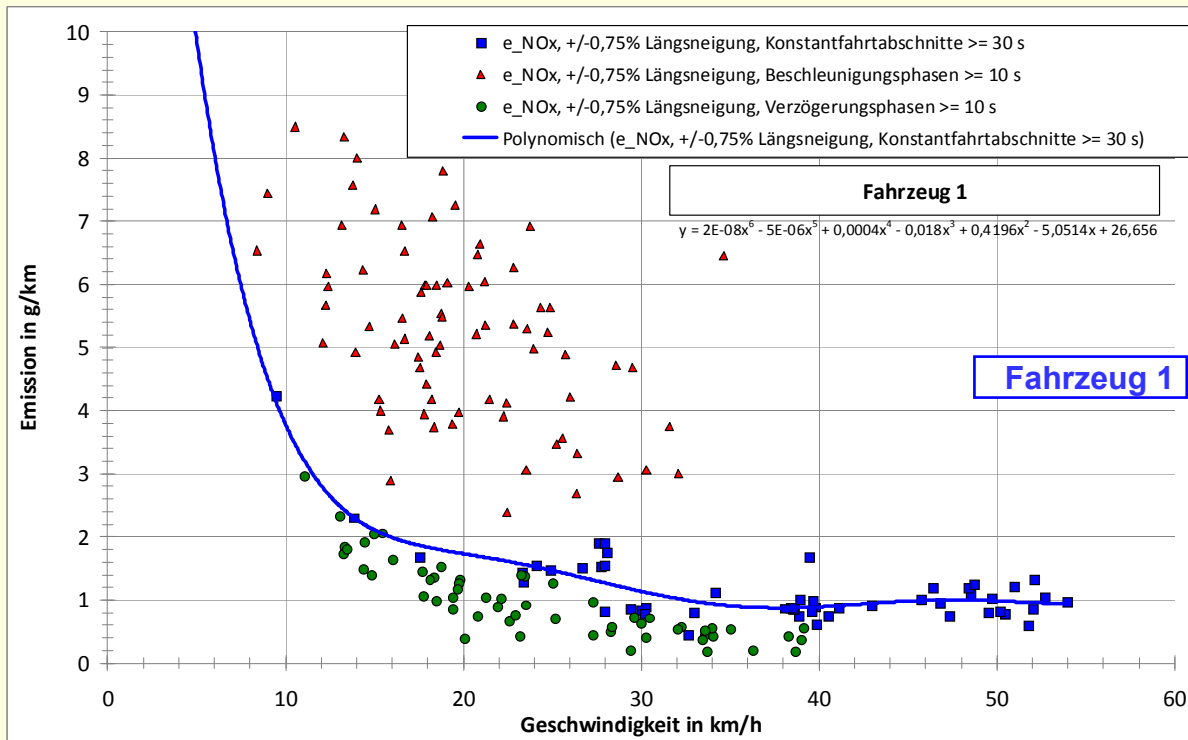
Ergebnisse:
**Geschwindigkeitsabhängigkeit
der Emissionen**

Gemessene NOx-Emission, Geschwindigkeitsabhängigkeit

Routen 1, 2 und 5



NO_x-Emission, Geschwindigkeitsabhängigkeit, differenziert nach Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Konstantfahrtsituationen

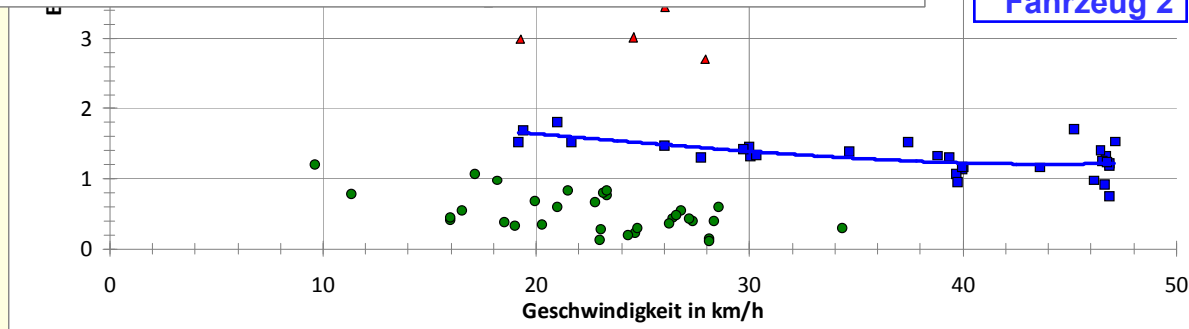


Längsneigung,
Abschnitte >= 30 s

Längsneigung,
Phasen >= 10 s

Längsneigung,
Phasen >= 10 s

e_NOx, +/-0,75% Längsneigung,
Abschnitte >= 30 s)

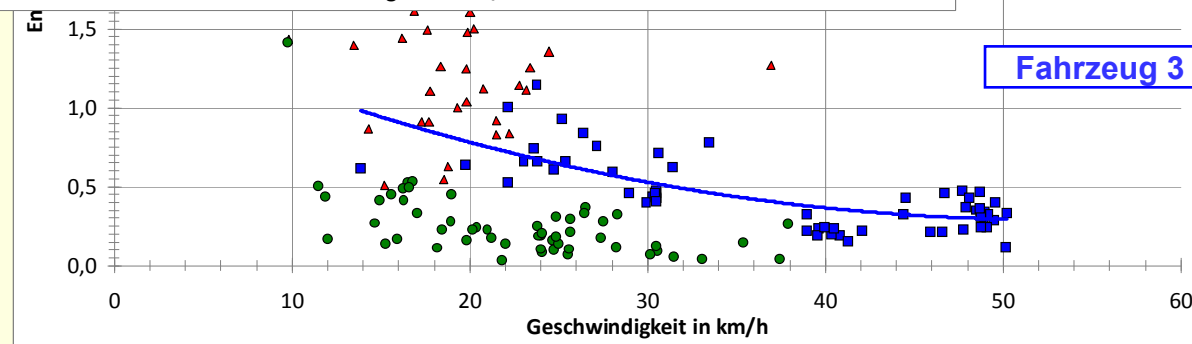


Längsneigung,
Abschnitte >= 30 s

Längsneigung,
Phasen >= 10 s

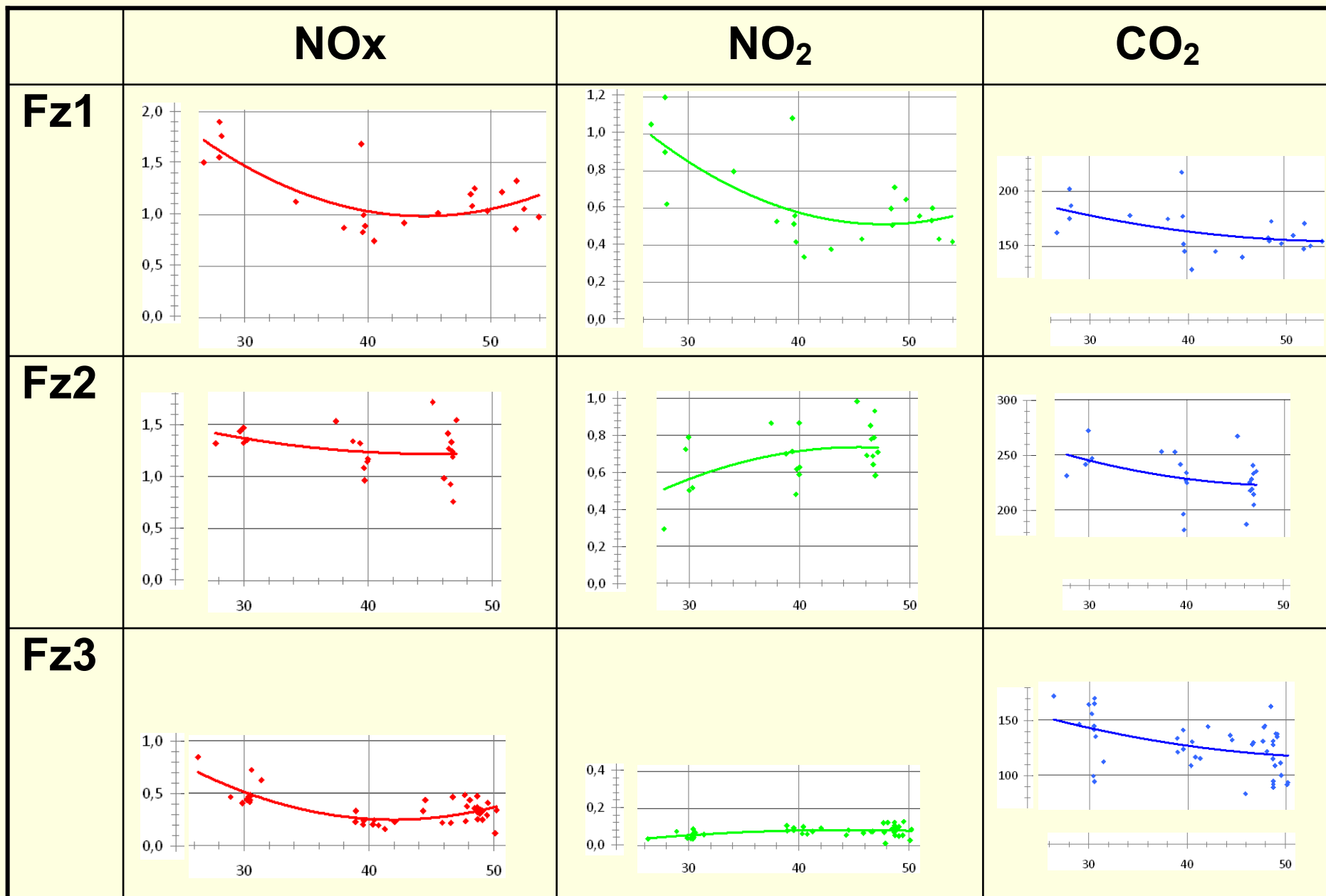
Längsneigung,
Phasen >= 10 s

e_NOx, +/-0,75% Längsneigung,
Abschnitte >= 30 s)



Gemessene Emission bei Höchstgeschwindigkeiten 30 / 40 / 50 km/h

jeweils Konstantfahrtabschnitte ≥ 30 s, $\pm 0,75\%$ Längsneigung, Emission in g/km



Einfluss unterschiedlicher Höchstgeschwindigkeiten

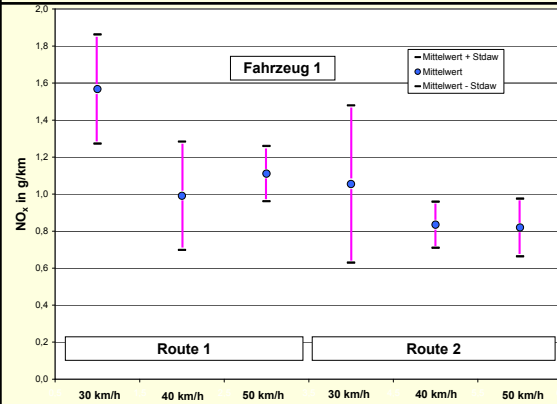
für Fahrstrecke 1 = Innenstadttring und Fahrstrecke 2 = Neckartor/Cannstatter Straße

	Fahrstrecke	Fahrzeug 1			Fahrzeug 2			Fahrzeug 3		
		NO2	NOx	CO2	NO2	NOx	CO2	NO2	NOx	CO2
30 km/h min max stdaw	1	0,915	1,568	180,905	0,580	1,369	243,819	0,060	0,520	142,018
		0,623	1,122	162,335	0,501	1,323	241,017	0,039	0,404	111,941
		1,198	1,897	202,161	0,724	1,432	246,473	0,089	0,720	163,745
		0,223	0,295	14,788	0,125	0,057	2,731	0,021	0,143	20,068
40 km/h min max stdaw	1	0,533	0,991	160,239	0,698	1,299	239,400	0,088	0,207	126,273
		0,338	0,741	129,203	0,587	1,143	224,446	0,063	0,156	114,927
		1,086	1,681	217,245	0,866	1,530	252,515	0,108	0,237	143,668
		0,236	0,292	28,305	0,107	0,155	13,507	0,018	0,033	12,160
50 km/h min max stdaw	1	0,558	1,110	157,866	0,762	1,389	229,462	0,072	0,292	116,907
		0,420	0,856	147,745	0,583	1,223	204,393	0,029	0,119	91,375
		0,712	1,327	172,689	0,983	1,711	266,529	0,130	0,435	135,923
		0,095	0,149	8,627	0,134	0,180	20,157	0,029	0,098	18,247
30 km/h min max stdaw	2	0,616	1,055	178,989	0,541	1,391	251,223	0,053	0,511	140,826
		0,422	0,785	155,249	0,293	1,317	230,829	0,036	0,429	94,110
		0,980	1,906	214,388	0,789	1,465	271,617	0,077	0,845	171,529
		0,174	0,425	20,522	0,351	0,105	28,842	0,017	0,148	32,344
40 km/h min max stdaw	2	0,538	0,835	155,353	0,654	1,072	203,662	0,083	0,242	124,997
		0,379	0,620	126,325	0,479	0,963	181,608	0,064	0,196	108,535
		0,693	1,017	174,756	0,866	1,170	233,469	0,102	0,330	140,606
		0,132	0,125	18,562	0,196	0,104	26,786	0,015	0,063	13,665
50 km/h min max stdaw	2	0,548	0,820	166,611	0,722	0,963	215,243	0,088	0,355	121,134
		0,391	0,755	130,971	0,579	0,759	186,935	0,013	0,217	82,941
		0,835	1,199	237,555	0,931	1,186	232,732	0,126	0,482	162,037
		0,131	0,156	31,493	0,149	0,176	20,493	0,030	0,080	23,567

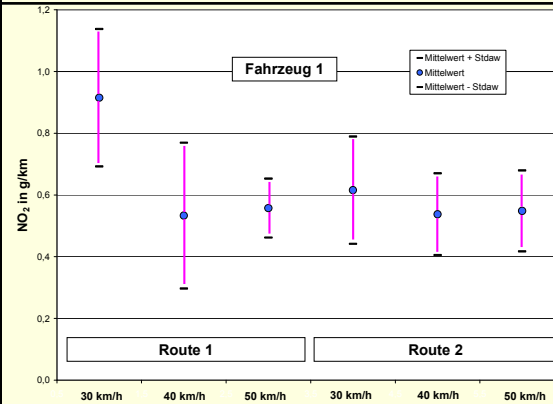
Jeweils Konstantfahrabschnitte >=30 s, +/-0,75% Längsneigung, Emission in g/km

NO_x

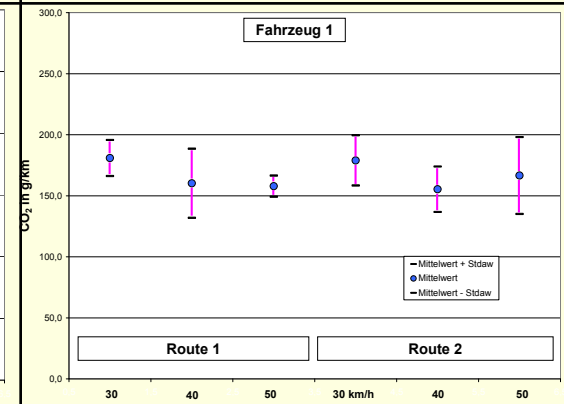
Fz1



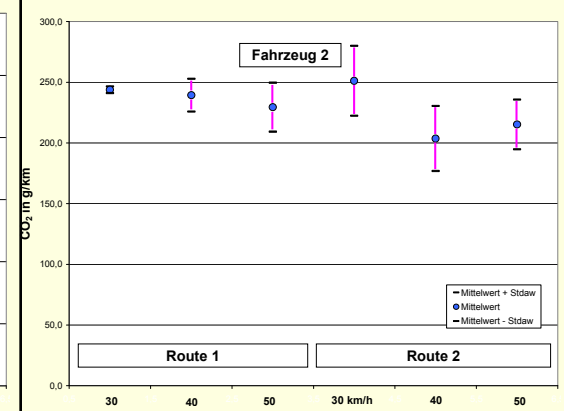
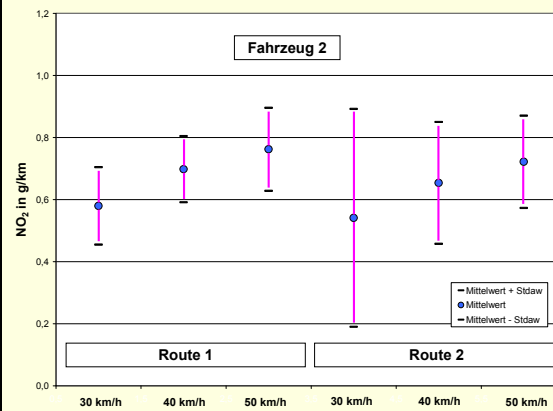
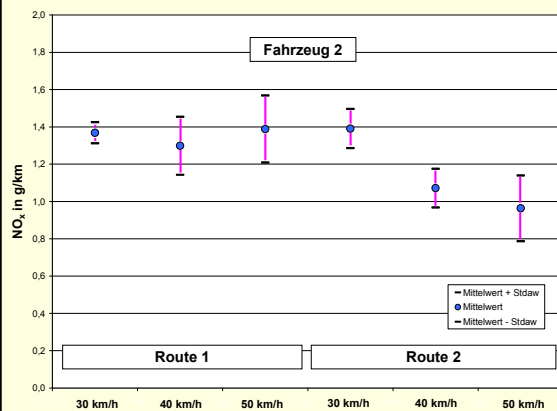
NO₂



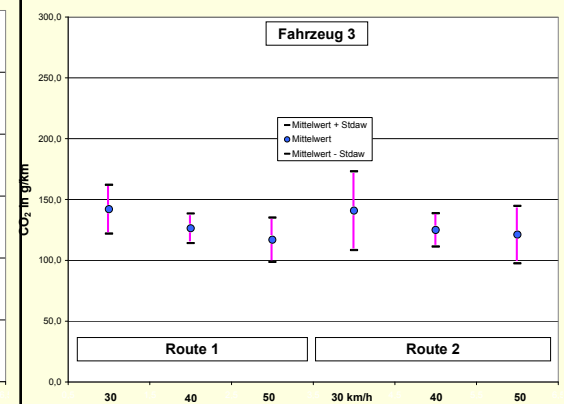
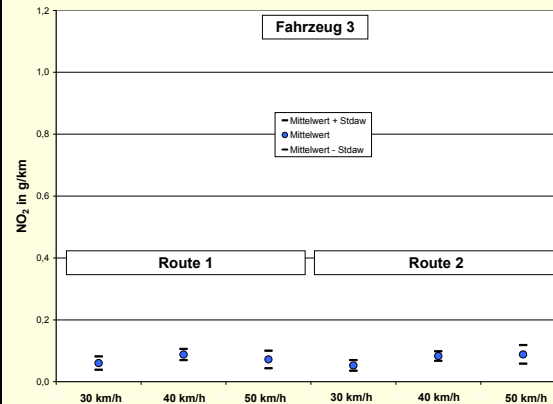
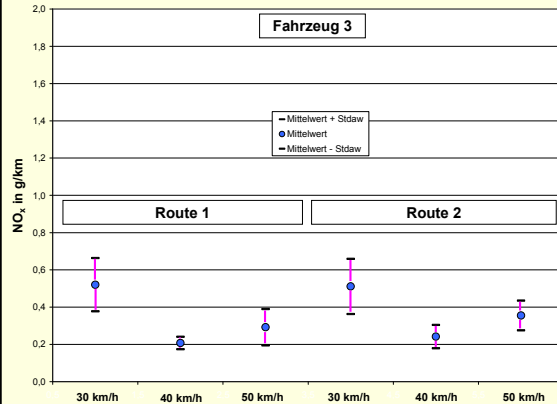
CO₂



Fz2



Fz3



Emissionsmessungen bei Höchstgeschwindigkeiten 30 / 40 / 50 km/h

Die PEMS-Messungen ergeben:

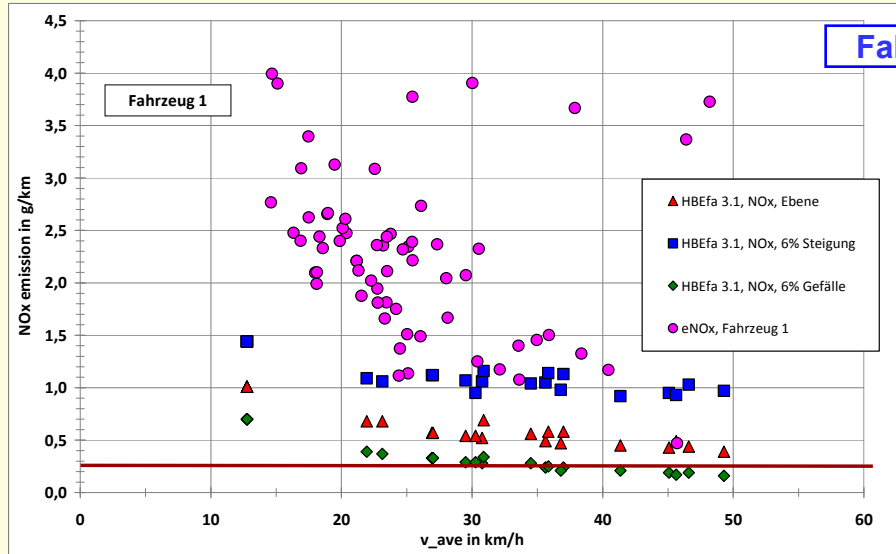
- **T40 $\approx$ T50** bei NO_x, NO₂ und CO₂ für die Fz 1-3:
Emissionen bei T40 liegen etwa gleich hoch wie bei T50
- **T30 > T40/T50** für NO_x und CO₂:
 - Bei T30 sind die **NO_x- und CO₂-Emissionen höher**.
 - Die **NO₂-Emission** bei T30 verhält sich **uneinheitlich**:
 - Bei Fz 2+3 niedrigere NO₂-Emissionen als bei T40/T50,
 - bei Fz 1 höhere NO₂-Emissionen
- Eine **Emissionsminderung** ist **durch die Einführung von T40 oder T30** nach diesen Ergebnissen **nicht zu erwarten**.
Falls T40 aus anderen Gründen eingeführt werden soll, so erscheint dies aus Emissionssicht vertretbar.

Gemessene Emission im Verhältnis zu HBEFA

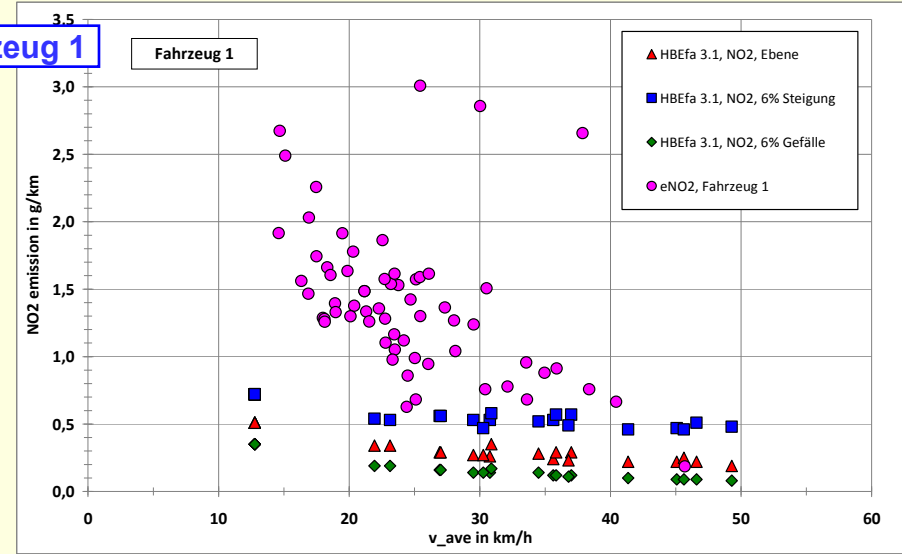
Gemessene Emission im Verhältnis zu HBEFA 3.1

NO_x

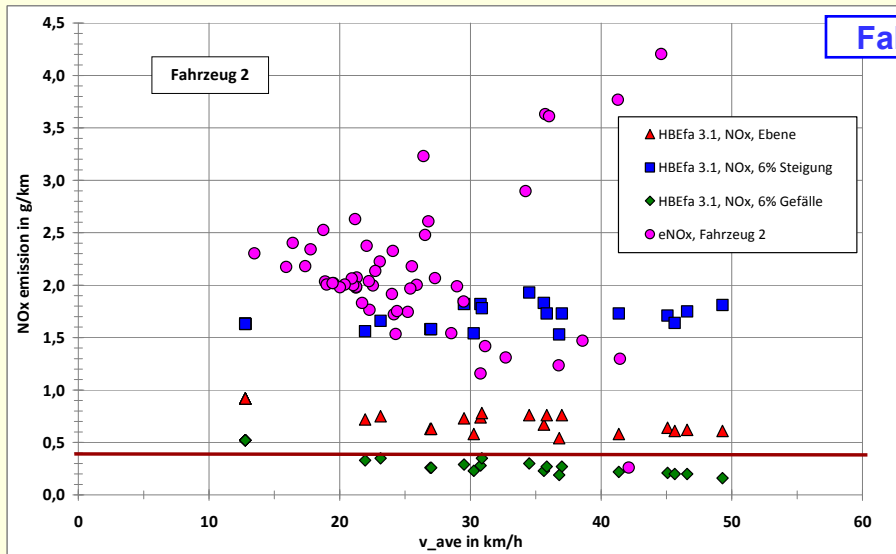
NO₂



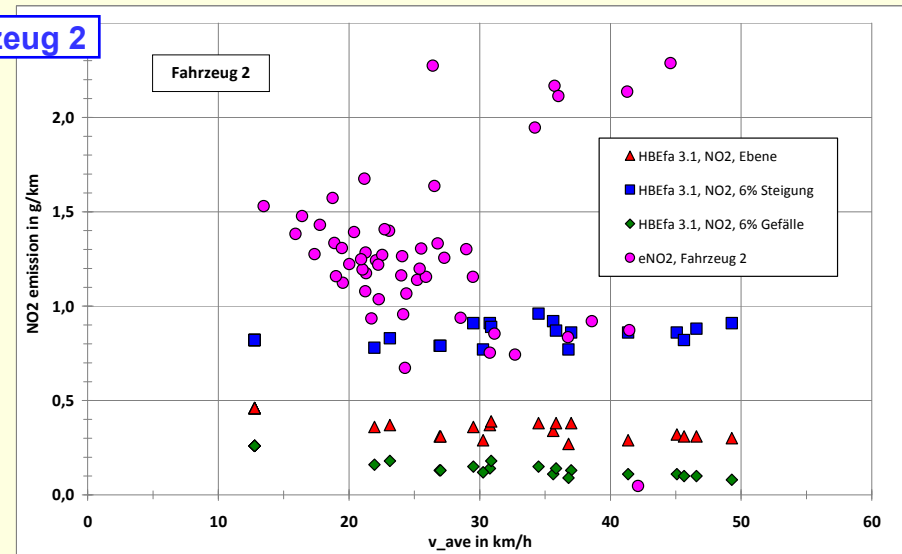
Fz 1, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_x



Fz 1, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO₂



Fz 2, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_x

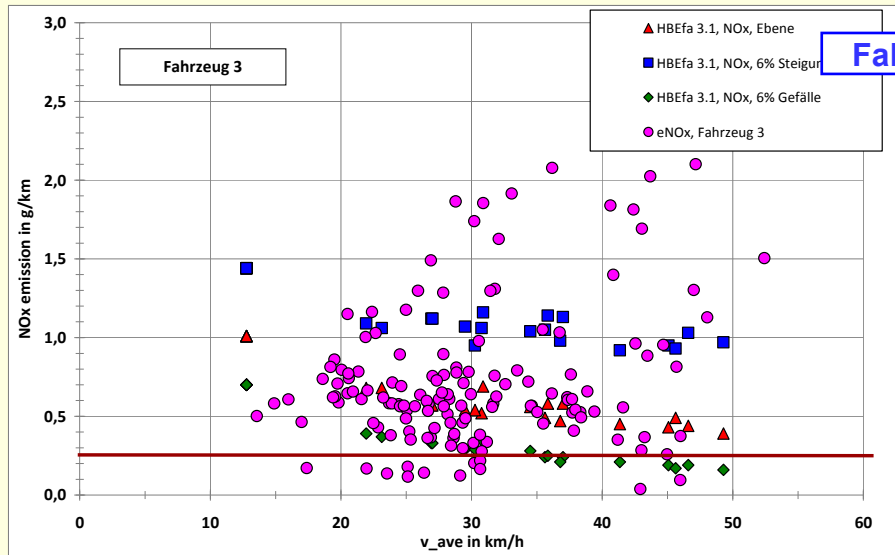


Fz 2, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO₂

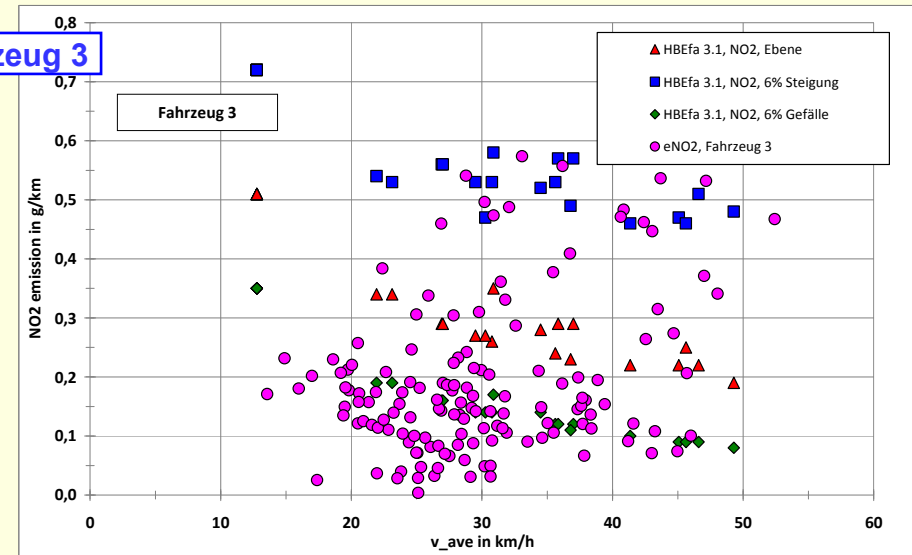
Gemessene Emission im Verhältnis zu HBEFA 3.1

NO_x

NO₂



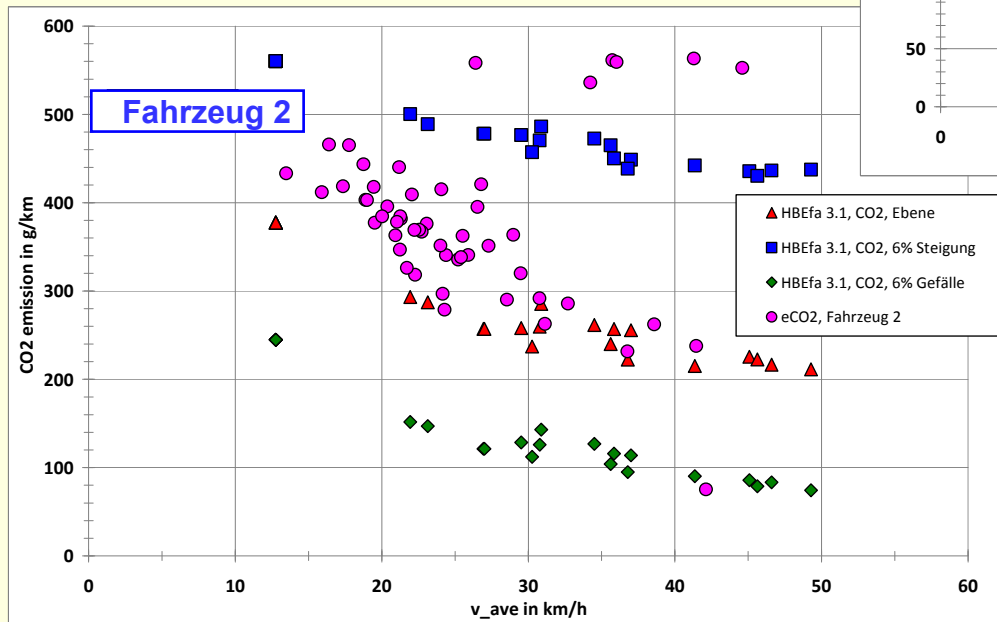
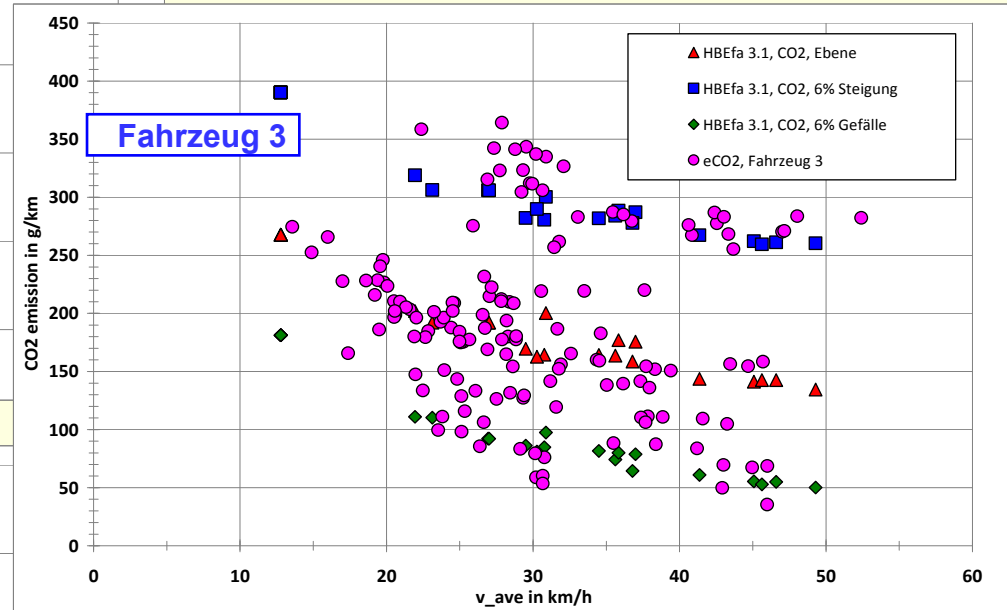
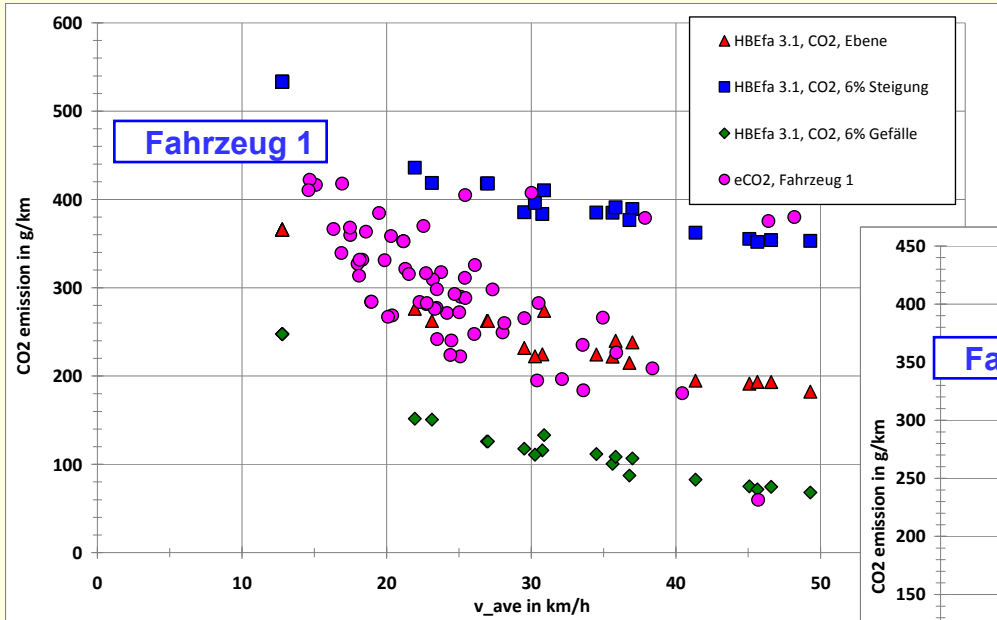
Fz 3, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_x



Fz 3, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO₂

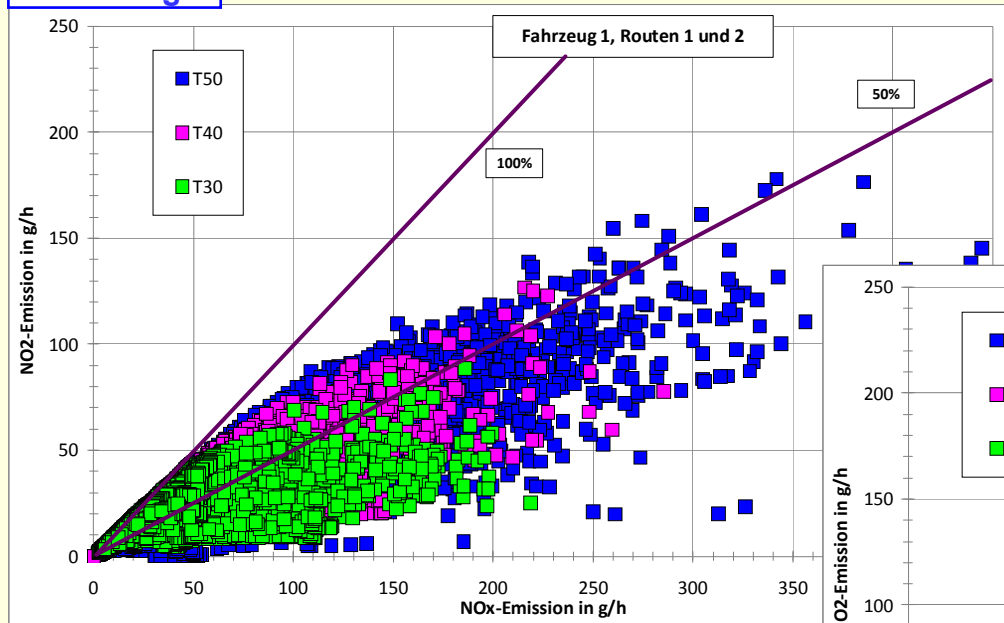
Gemessene Emission im Verhältnis zu HBEFA 3.1

CO₂



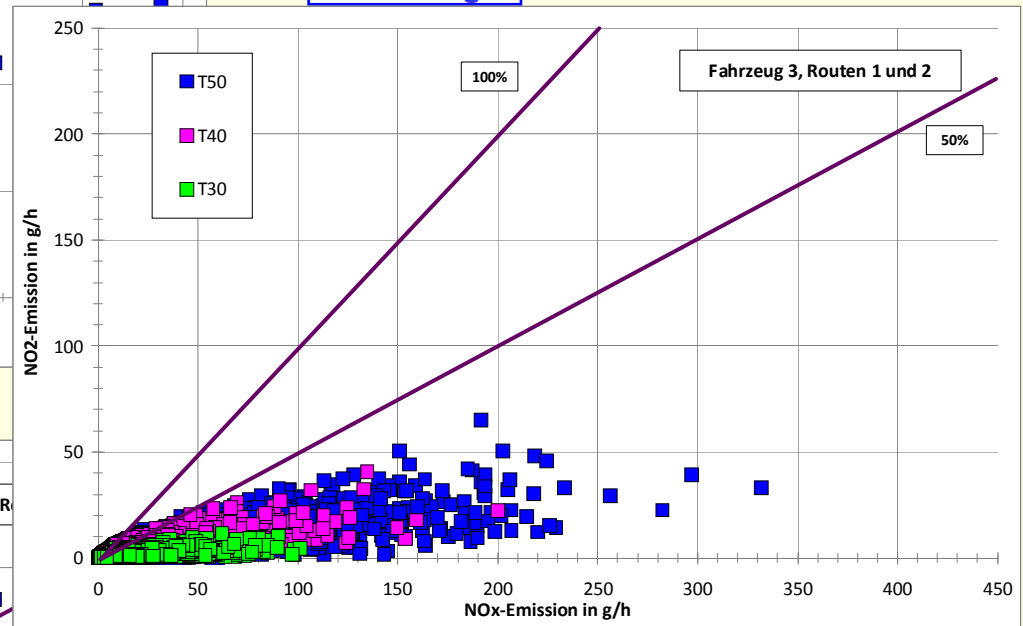
NO₂/NO_x-Verhältnis

Fahrzeug 1

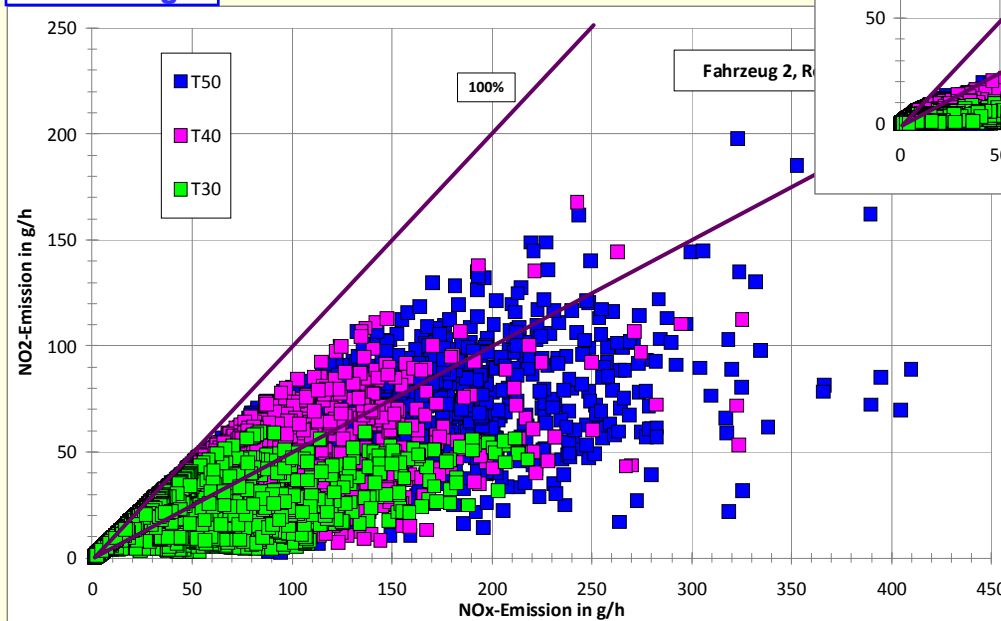


NO₂/NO_x-Verhältnis der Emission, Fz. 1 - 3, Routen 1 und 2

Fahrzeug 3

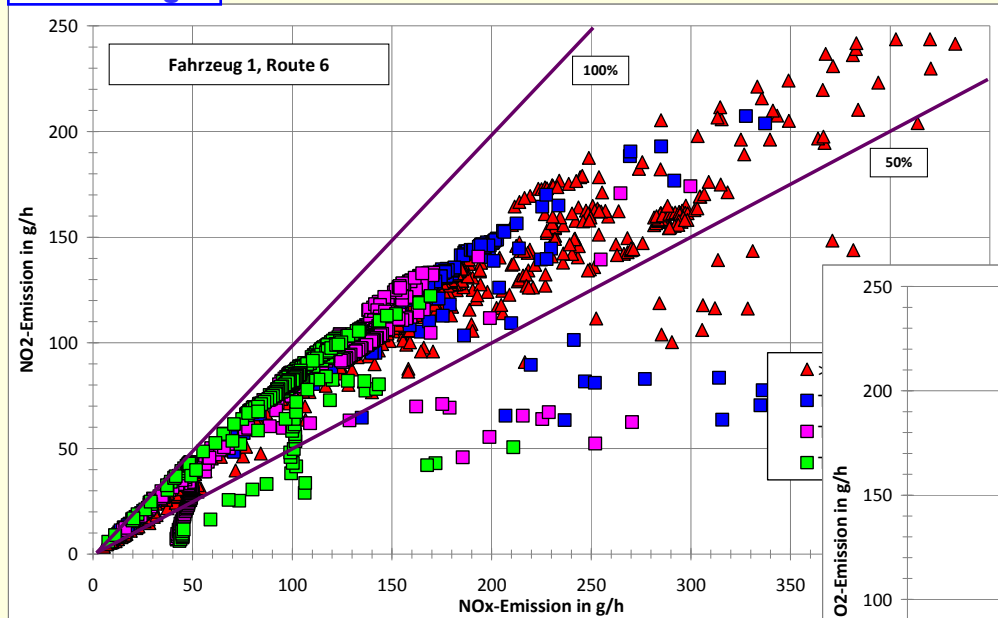


Fahrzeug 2



Jeder Punkt = 1 sec

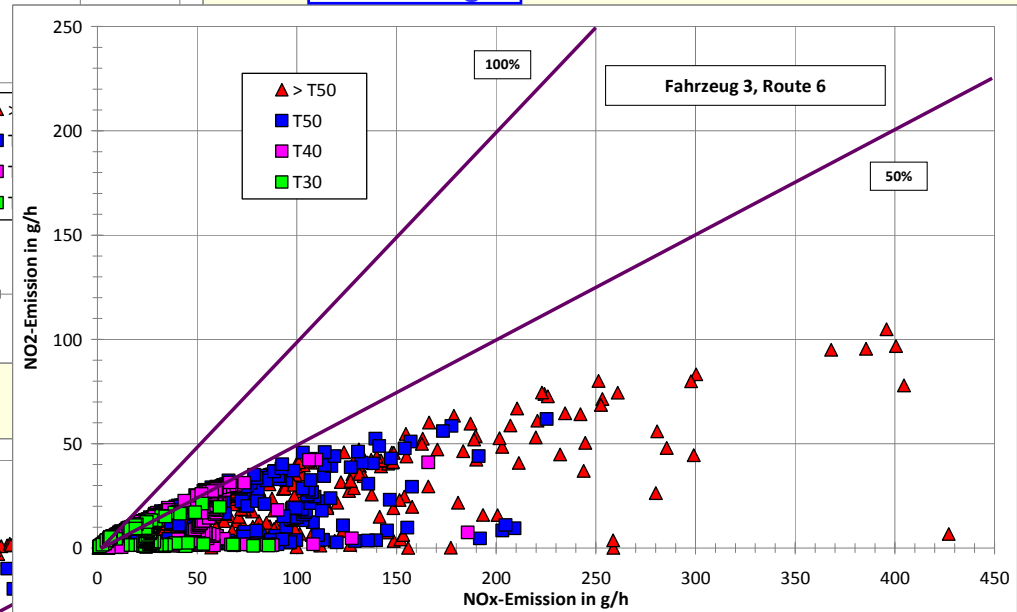
Fahrzeug 1



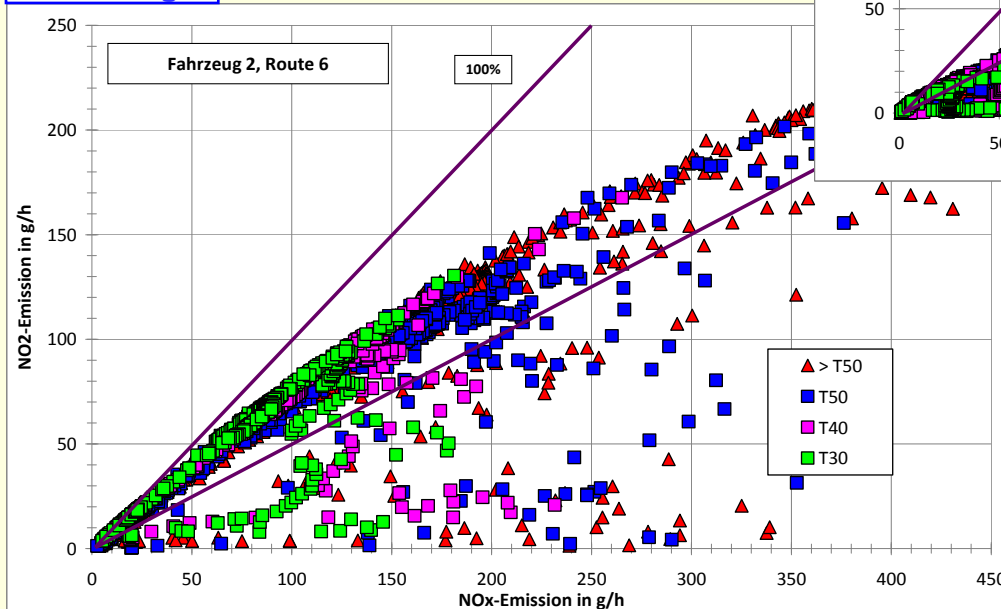
Einfluss von Steigungsstrecken auf das NO₂/NO_x-Verhältnis

Fz. 1 - 3, Route 6 (Lederberg, ≤ 7% Steigung)

Fahrzeug 3



Fahrzeug 2

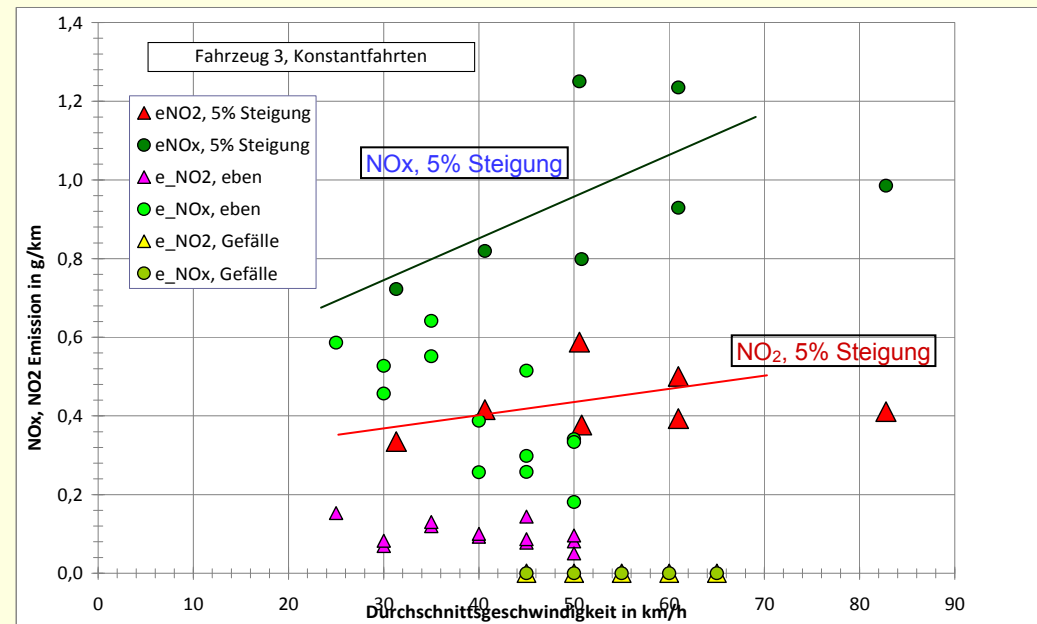
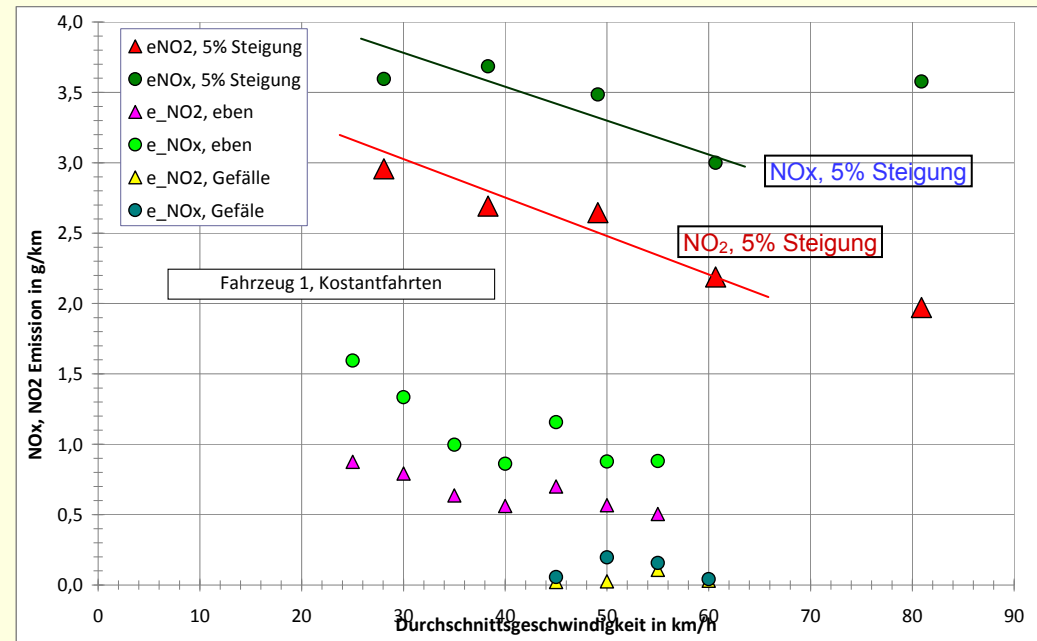


Allerdings: hier fast ausschließlich
Bergfahrt dargestellt!

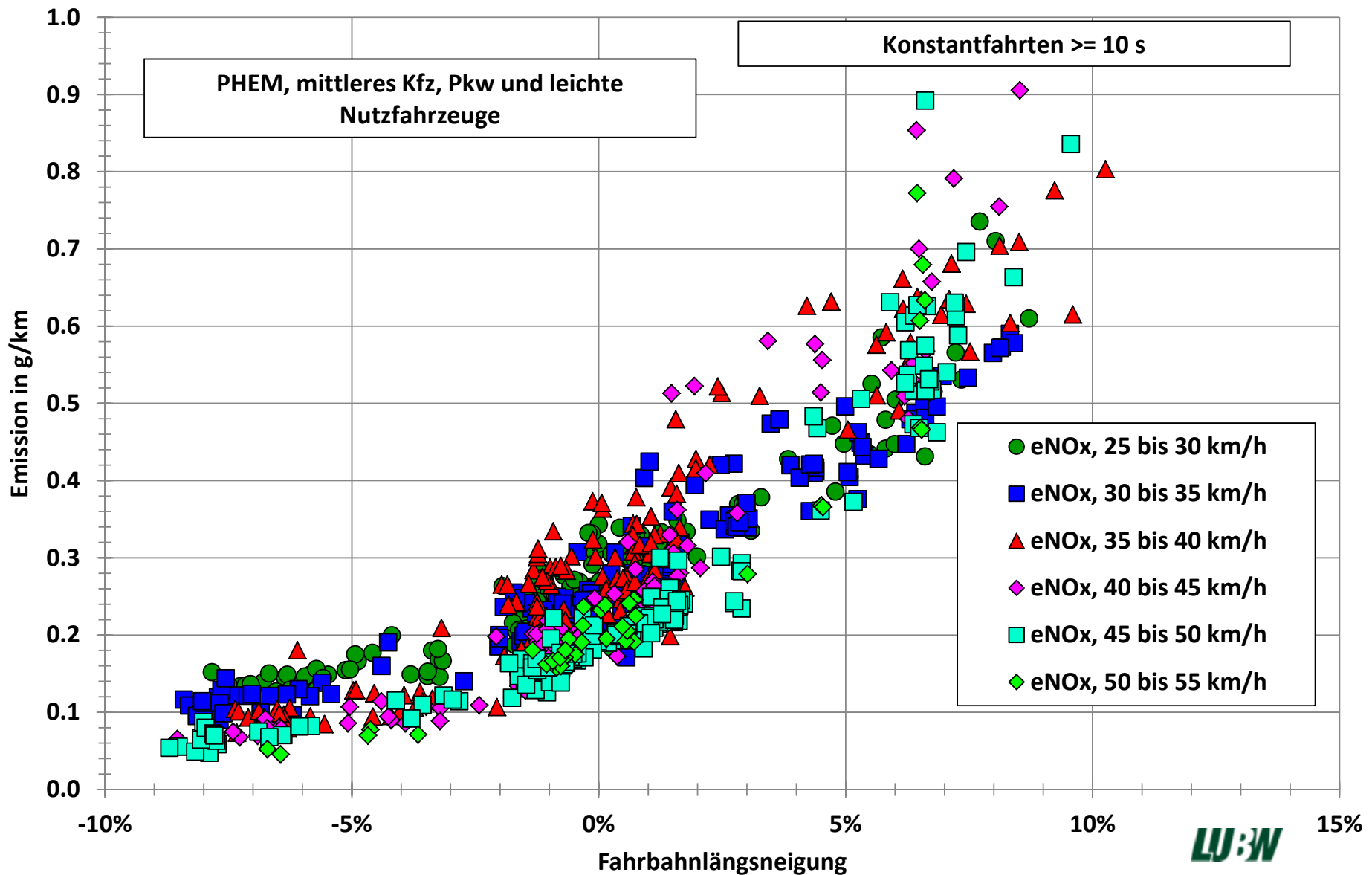
Steigungsstrecken

Einfluss von Steigungsstrecken auf die gemessenen NO_x- / NO₂-Emissionen, geschwindigkeitsabhängig

- NO_x- und NO₂-Emission bei zunehmender Geschwindigkeit und 5% Steigung: uneinheitlich, abhängig vom Fahrzeug
- Bei allen Fahrzeugen Abnahme der CO₂-Emission mit zunehmender Geschwindigkeit



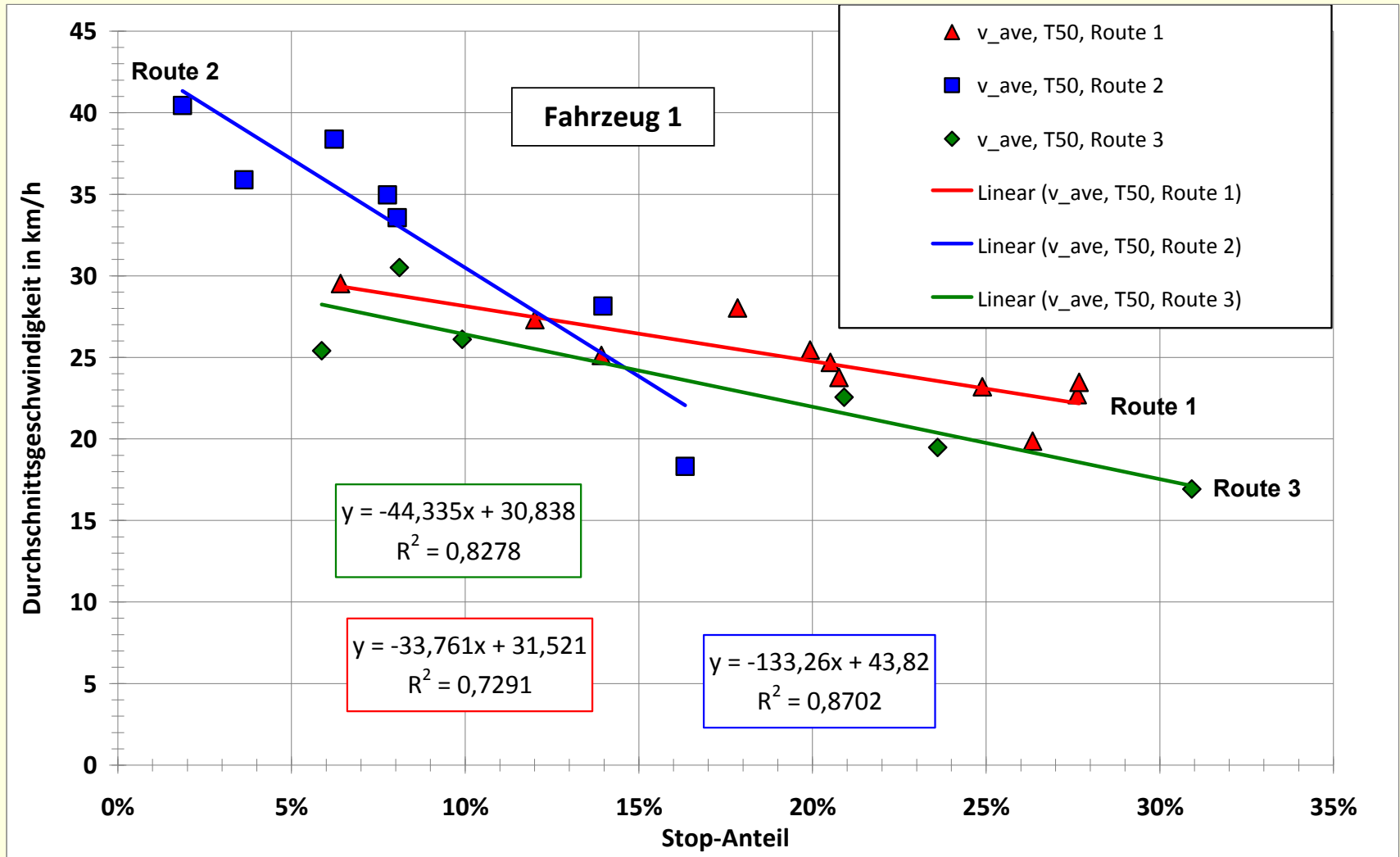
NO_x-Emissionen in Abhängigkeit von der Fahrbahnlängsneigung für Konstantfahrabschnitte



Verstetigung

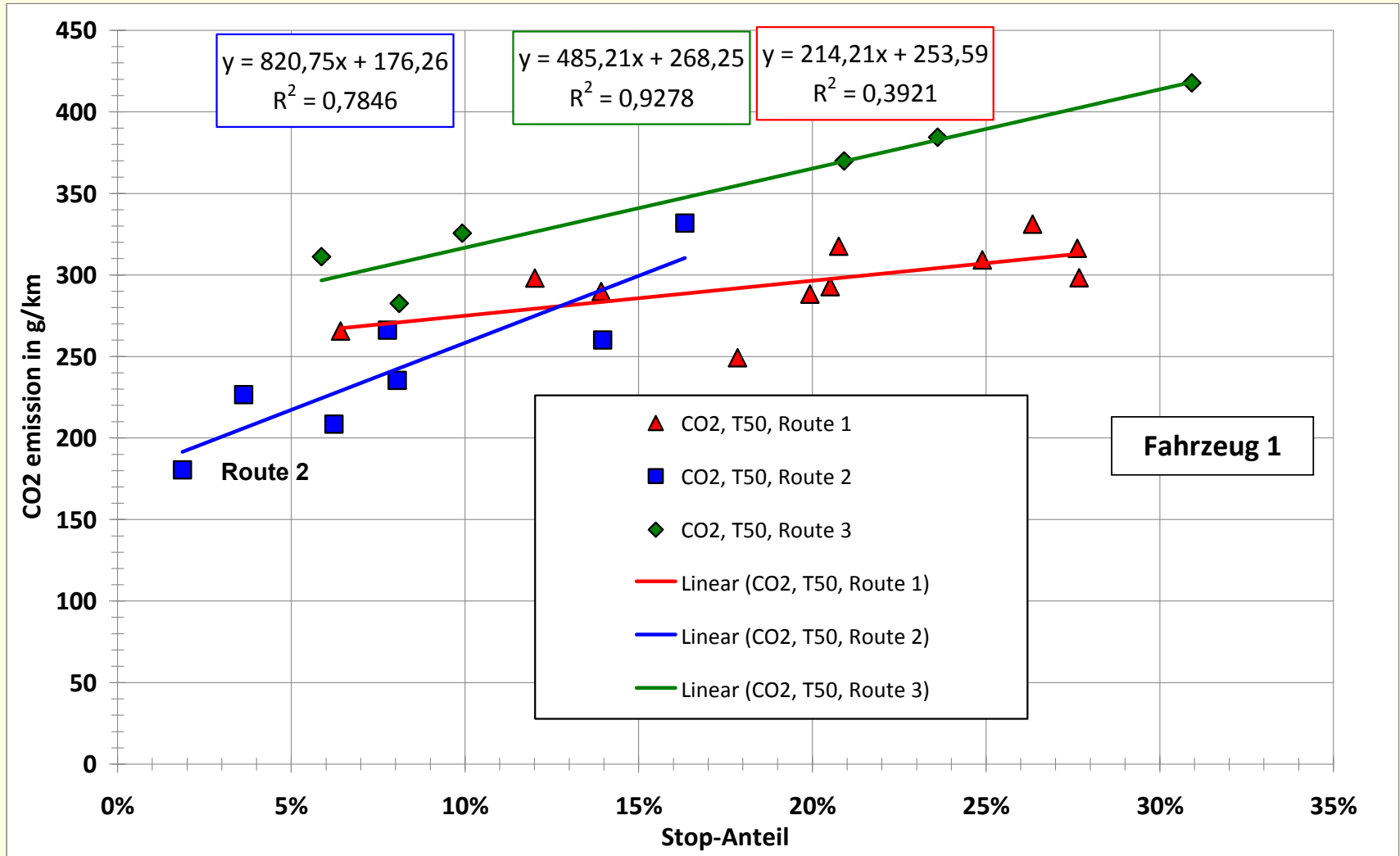
Einfluss von Verkehrsverstetigung

Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Stop-Anteil



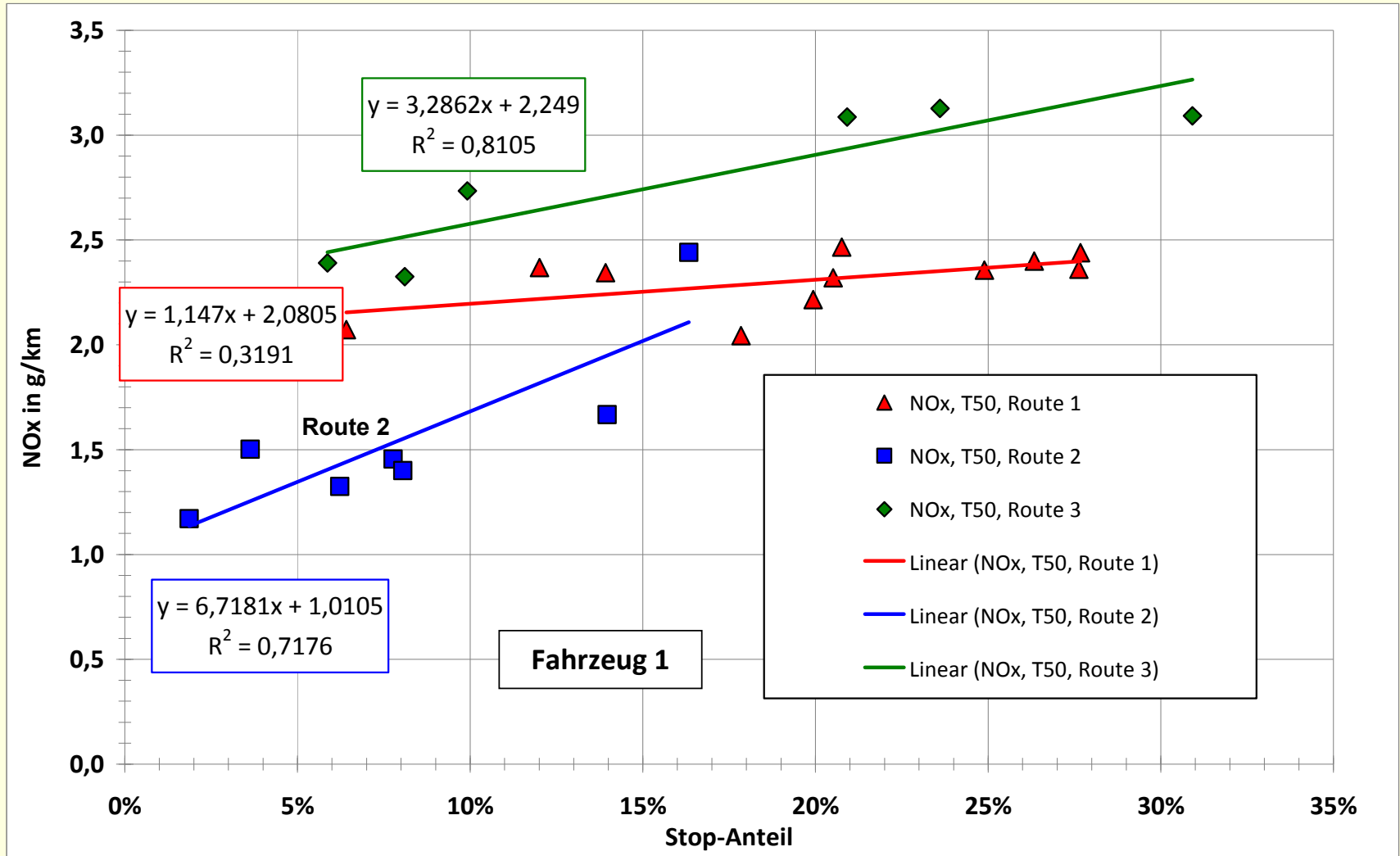
Einfluss von Verkehrsverstetigung

CO₂-Emission in Abhängigkeit vom Stop-Anteil



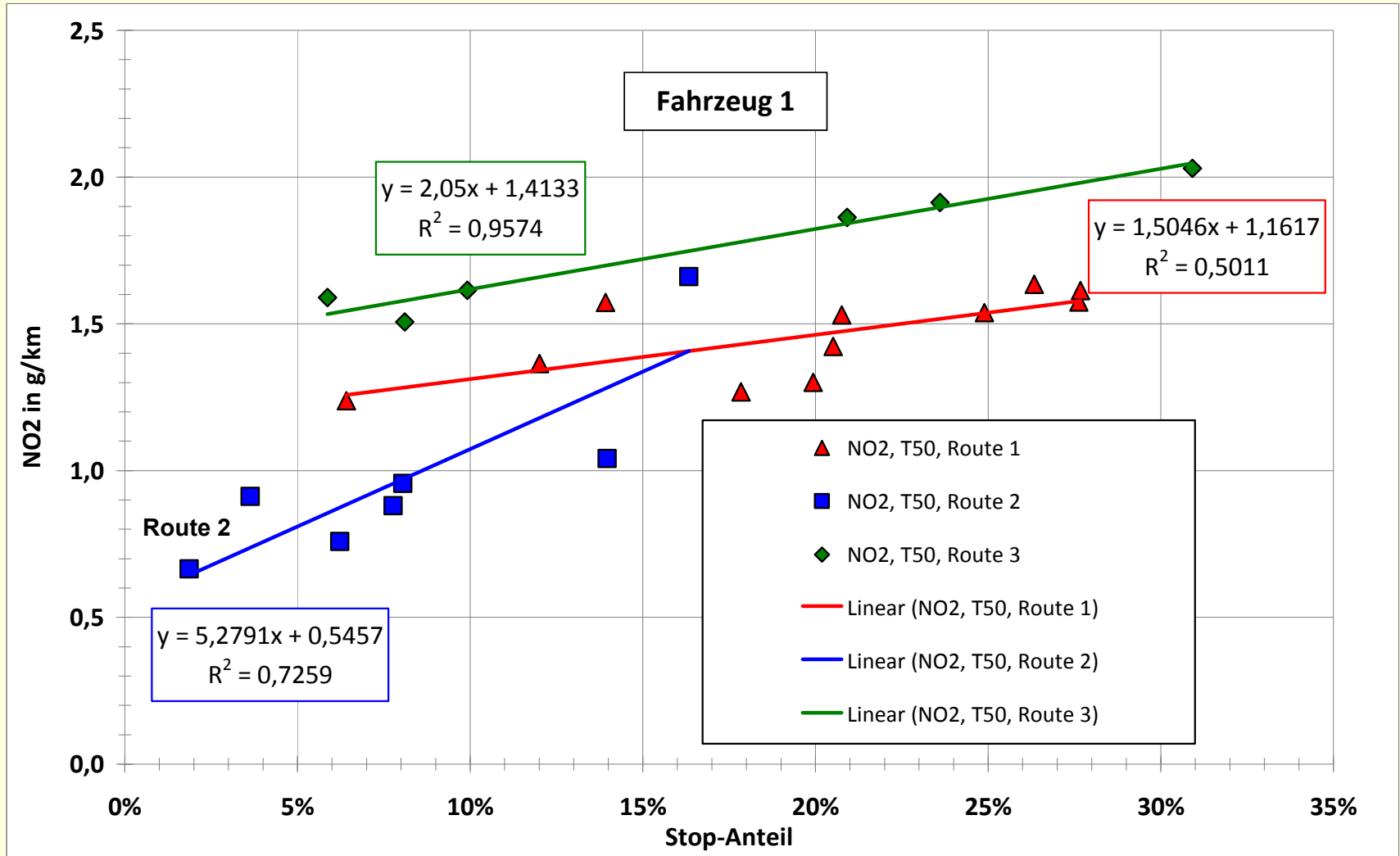
Einfluss von Verkehrsverstetigung

NOx-Emission in Abhängigkeit vom Stop-Anteil



Einfluss von Verkehrsverstetigung

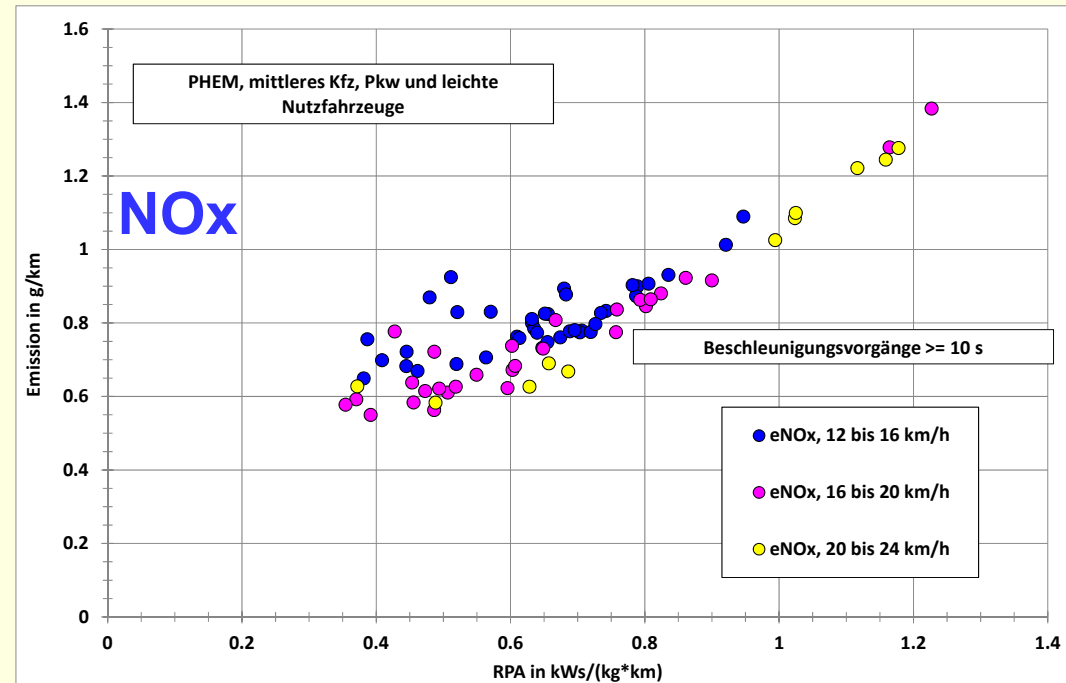
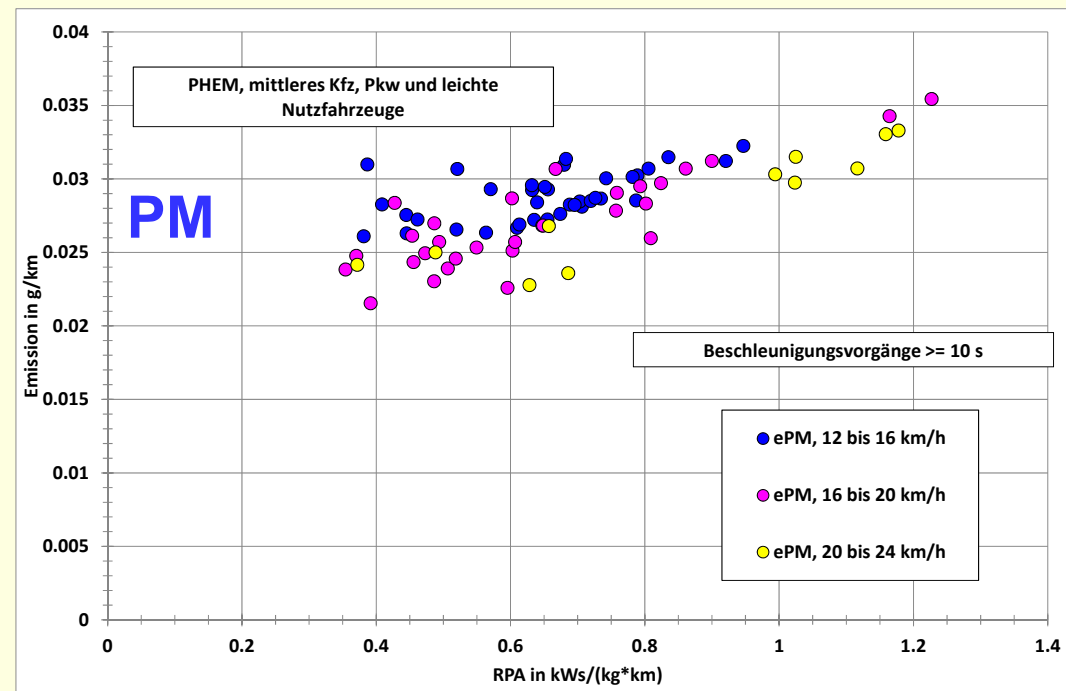
NO₂-Emission in Abhängigkeit vom Stop-Anteil



PHEM:

Emissionen in Abhängigkeit von der relativen positiven Beschleunigung (RPA) für Beschleunigungsvorgänge

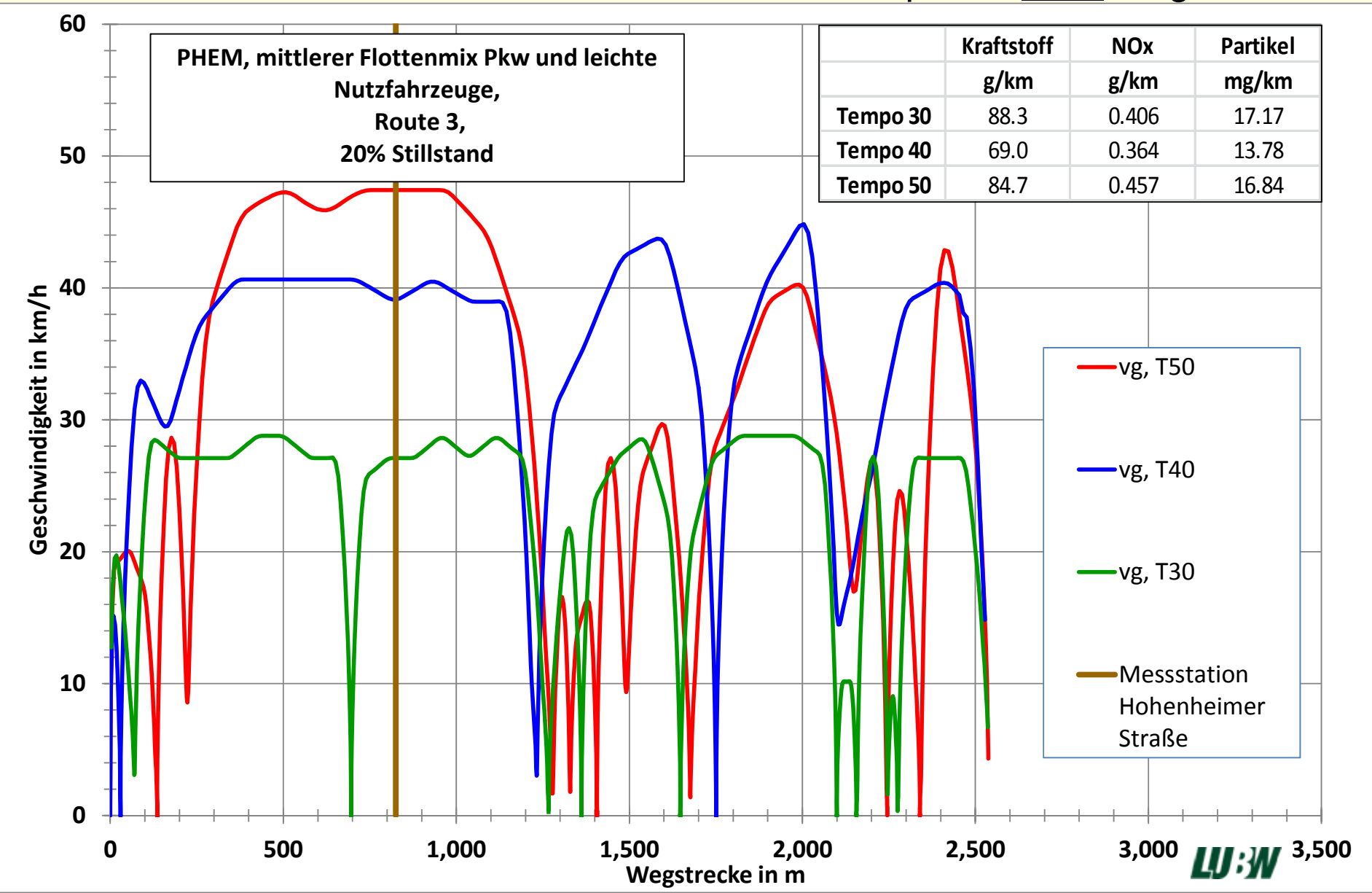
- RPA ist definiert als Zeitintegral über $v \cdot a$ für positives a dividiert durch die Fahrstrecke.
- Die Dimension ist m/s^2 oder $\text{kWs}/(\text{kg} \cdot \text{km})$. Letzteres ist die spezifische Beschleunigungsarbeit für den betrachteten Zyklus oder Fahrtabschnitt.
- Dargestellt sind PM und NOx; CO_2 zeigt ähnlichen Verlauf wie PM.
- Die Korrelation mit den Emissionen ist offensichtlich. NOx ist stark abhängig von der Fahrdynamik (Faktor 2!).



PHEM-Modellierung der Fahrprofile zu Tempolimit

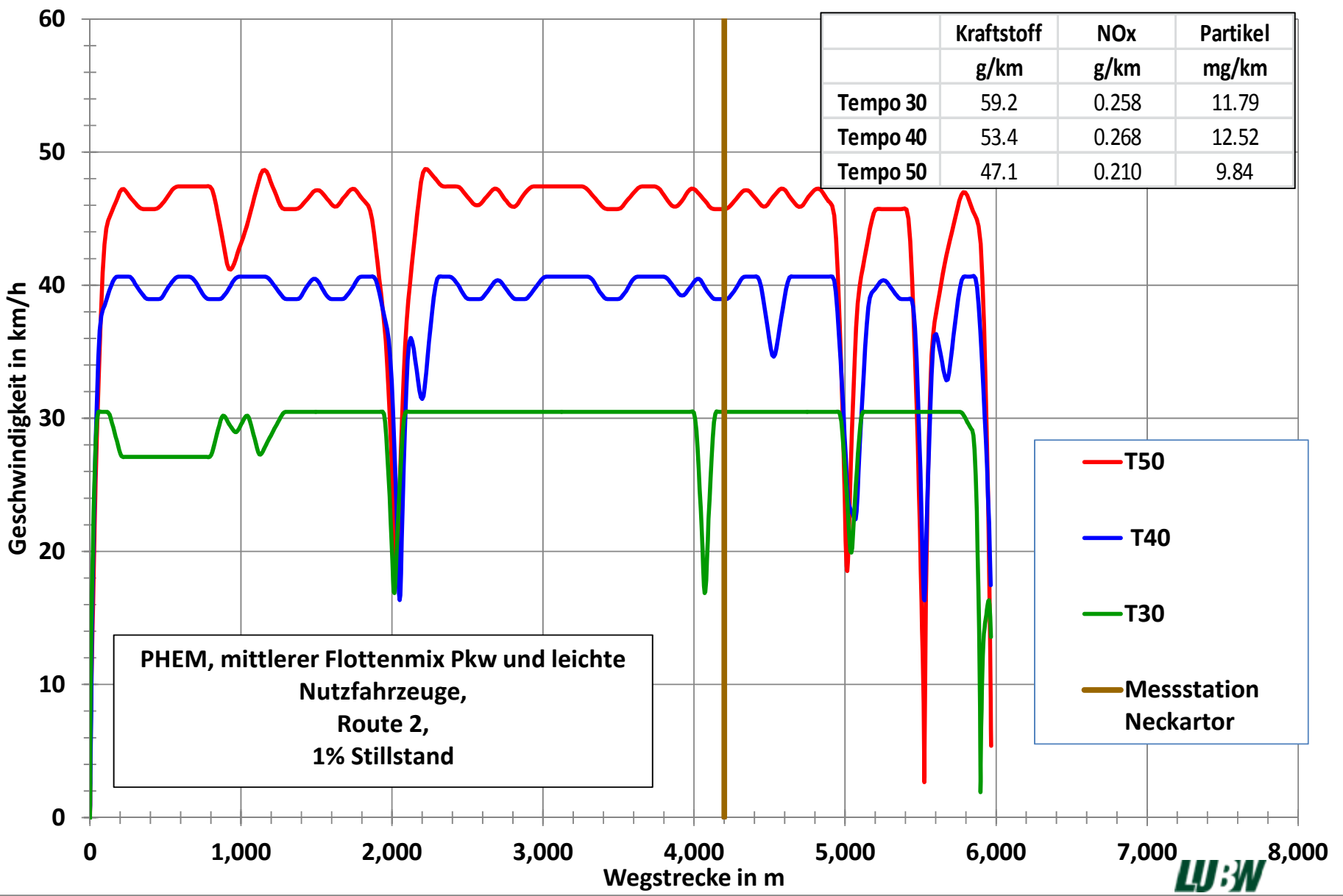
PHEM: Modellierung realer Fahrprofile bei 30 / 40 / 50 km/h

Fahrprofile nicht vergleichbar!

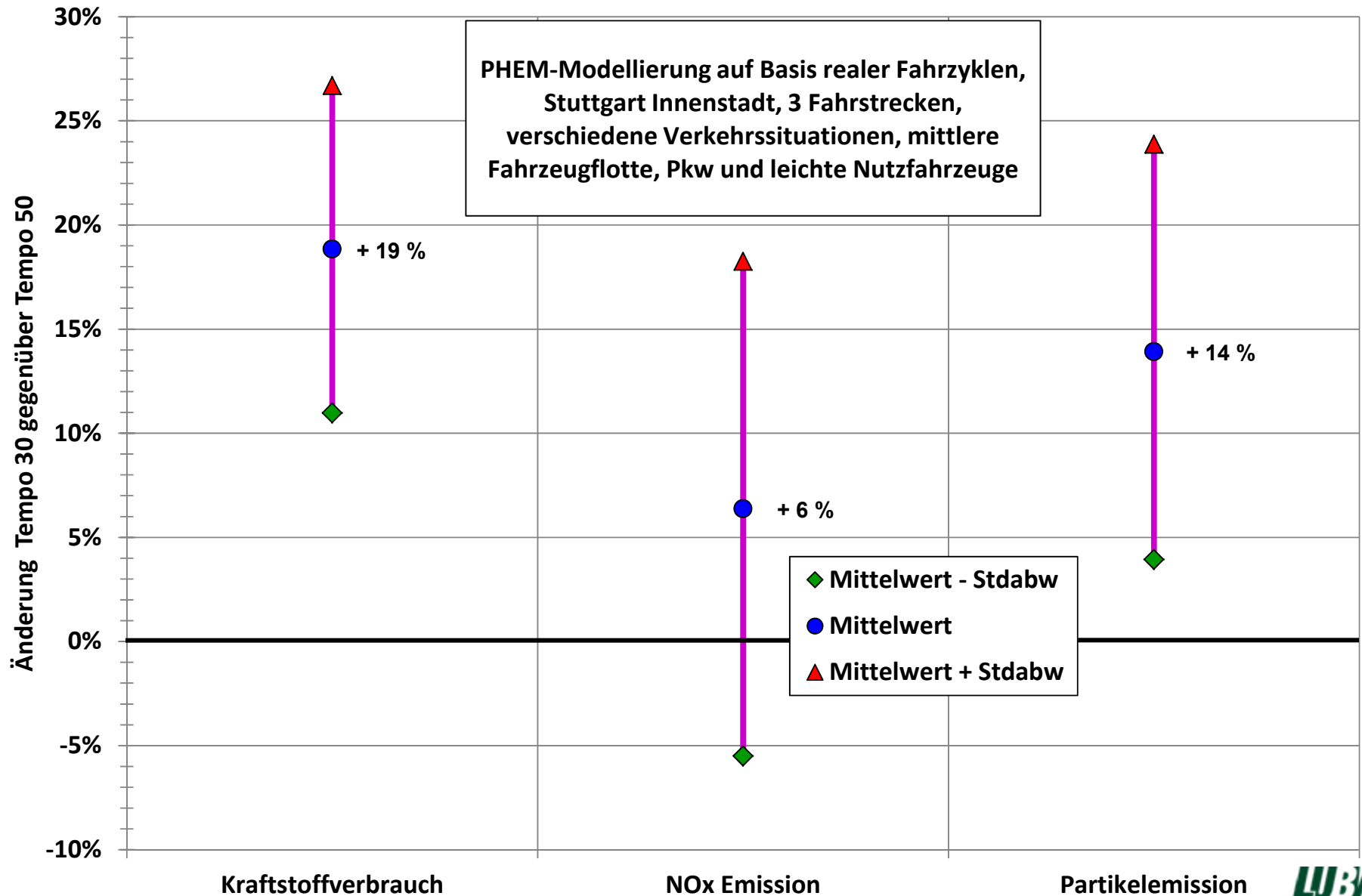


PHEM: Modellierung realer Fahrprofile bei 30 / 40 / 50 km/h

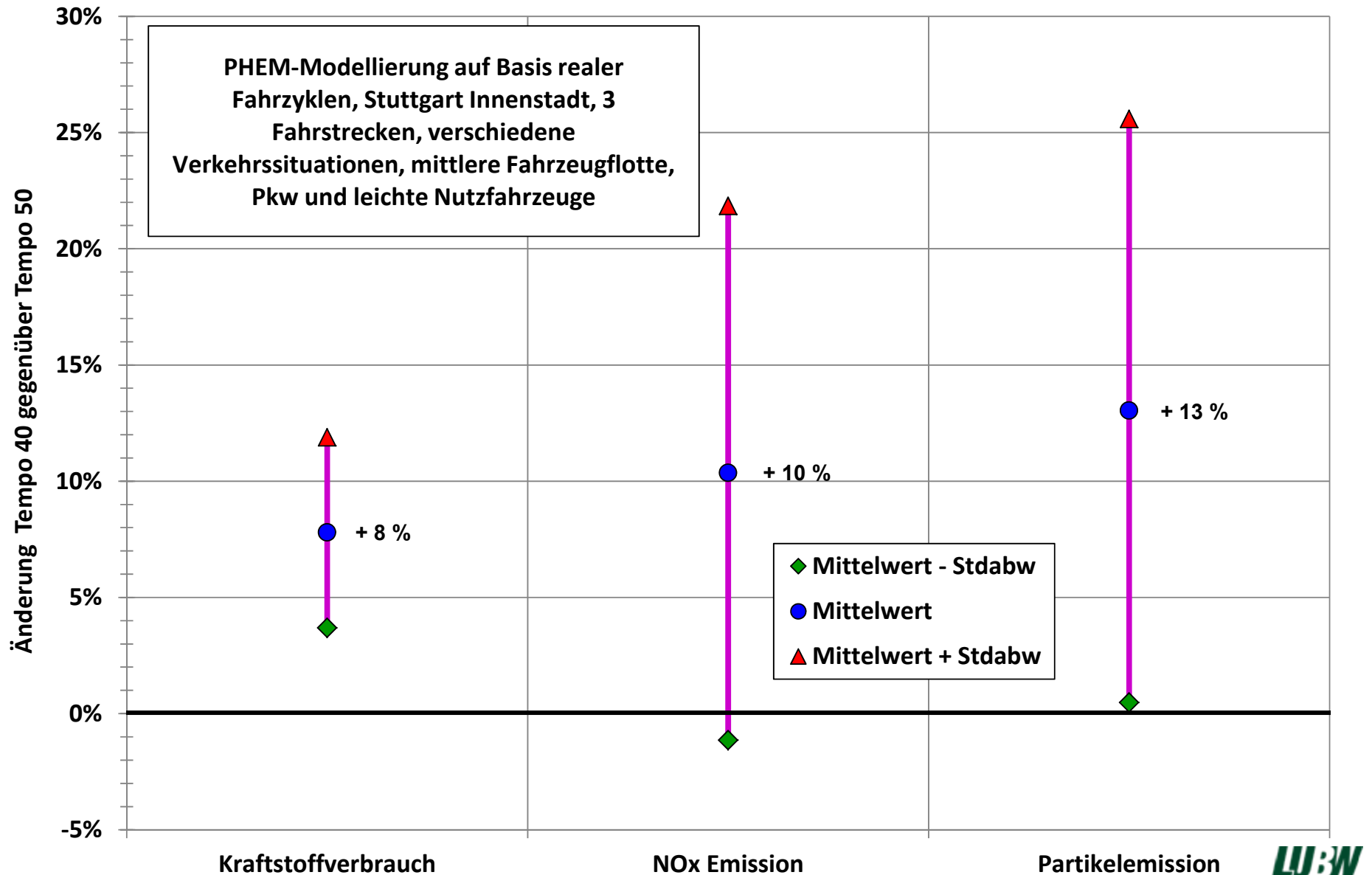
Fahrprofile vergleichbar!



berechnet für mittlere Fahrzeugflotte 95% Pkw/5% LNFz, Bezugsjahr 2010



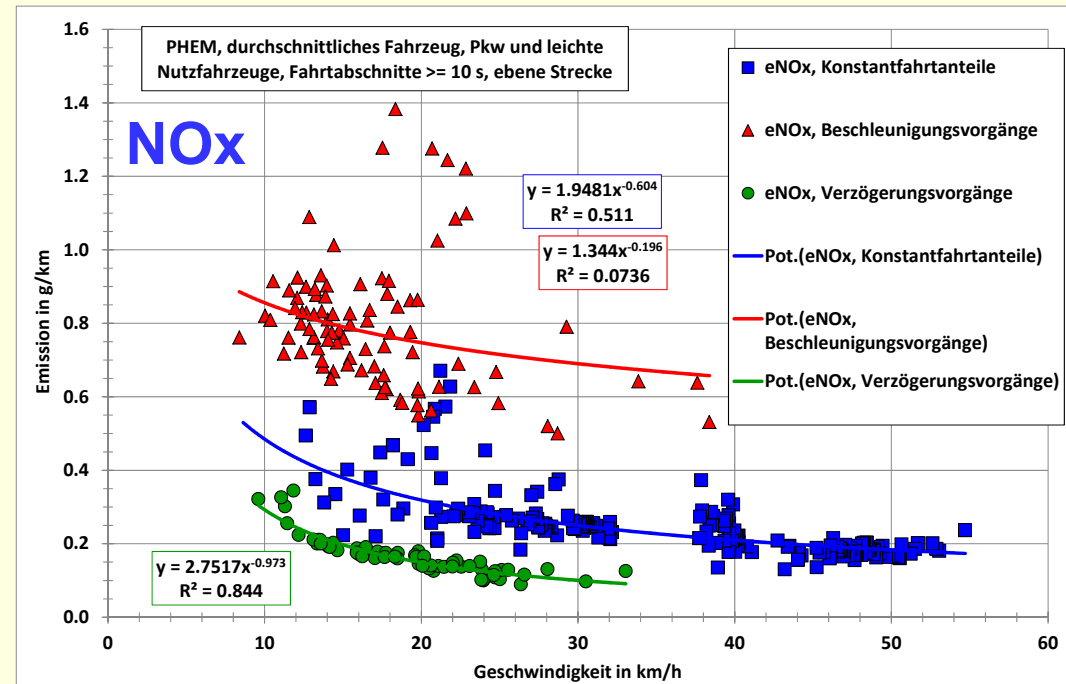
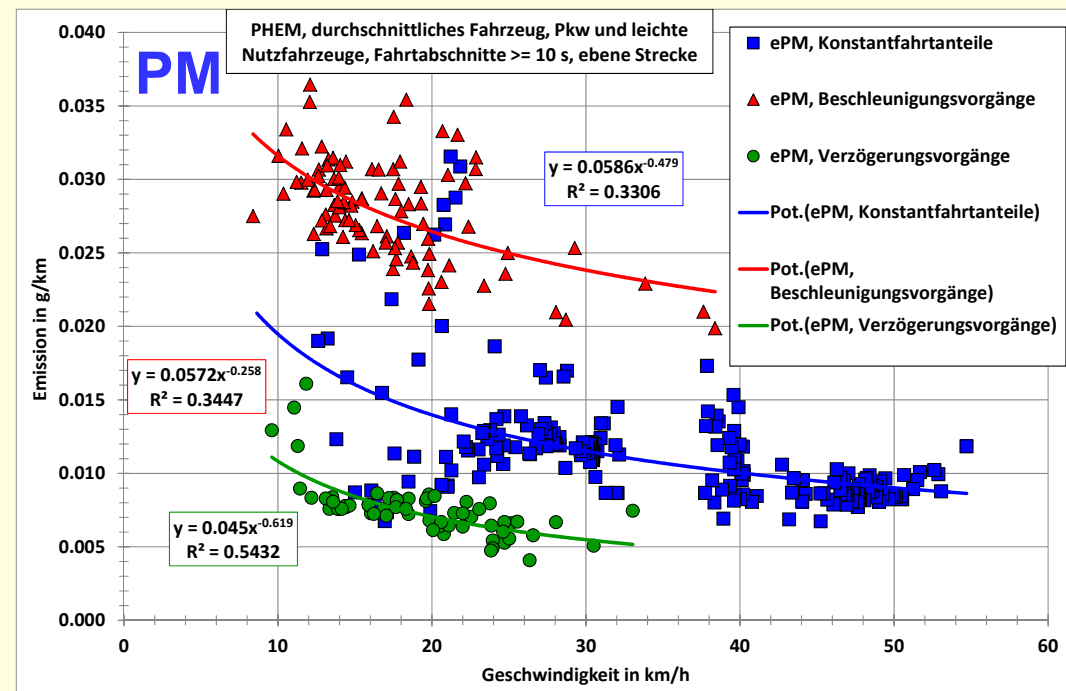
berechnet für mittlere Fahrzeugflotte 95% Pkw/5% LNFz, Bezugsjahr 2010



PHEM:

Berechnete Emissionen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Fahrzustand

- Dargestellt sind PM und NOx; CO₂ zeigt vergleichbaren Verlauf.
- Konstantfahrten sind definiert als Zustände mit Beschleunigungen zwischen +/- 1 km/h/s = - 0,2778 m/s² < a < 0,2778 m/s².
- Die Emissionen beschreiben ein mittleres Kfz für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge im Verhältnis 95% / 5% für das Bezugsjahr 2010.
- Die Konstantfahrtwerte streuen teilweise in die anderen Bereiche hinein. Dies liegt daran, dass nach obiger Definition leichte Beschleunigungen und Verzögerungen als Konstantfahrt eingeordnet werden.



Ergebnisse

- Teilweise **sehr hohe NO_x- und NO₂-Emissionen**, weit über HBEFA.
Teilweise **sehr hohe NO₂/NO_x-Anteile**.
→ Falls dies für größere Teile der Diesel-Pkw-Flotte zutrifft, dürfte darin eine Ursache der hohen NO₂-Immissionsbelastung in Stuttgart zu sehen sein.
- Emissionen bei Höchstgeschwindigkeiten 30 / 40 / 50 km/h:
Die **Messungen** ergeben **T40 ≈ T50** bei NO_x, NO₂ und CO₂ für die Fz 1-3
T30 > T40/T50 für NO_x und CO₂; NO₂ bei T30 uneinheitlich
- **Modellierung** der Fahrprofile mit **PHEM** auf Basis realer Fahrzyklen der Stuttgarter Innenstadt ergibt für die mittlere Fahrzeugflotte (95% Pkw/5% LNFz):
T30 und T40 > T50: Sowohl T30 als auch T40 führen zu höheren NO_x-, NO₂- und CO₂-Emissionen.
Eine **Emissionsminderung durch die Einführung von T40 oder T30** ist nach diesen Ergebnissen **nicht zu erwarten**.
- **Steigungen erhöhen PM- und NO_x-Emissionen erheblich**. Die Tempoabhängigkeit der PM- / NO_x-Emissionen an Steigungsstrecken ist nicht eindeutig.
- Die Verstetigung des Verkehrsflusses hat ein großes Potenzial zur Senkung der Schadstoffemissionen:
 - **Reduzierung der Stop-Anteile** führt zu deutlicher Emissionsminderung
 - **Reduzierung von Beschleunigungs-/Verzögerungsvorgängen (RPA)**
= Reduzierung der Fahrdynamik senkt Emissionen (NO_x: Faktor 2!)



Vielen Dank für Ihr Interesse!