

# Fachtagung Tempo 30 – Chancen, Hindernisse, Erfahrungen



## Schadstoff- und CO2-Emissionen bei Tempo 30

**Heinz Steven**

**08.11.2012**

# Übersicht



- **Einleitung und Präzisierung des Themas**
- **Modellhafte Darstellung der Einflussparameter für CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen von Kfz.**
- **Ergebnisse von PEMS-Messungen/PHEM-Berechnungen in Stuttgart.**
- **Schlussfolgerungen.**

# Einleitung



- **Luftreinhaltung und Lärmbekämpfung lässt sich in den Städten und Agglomerationen vor allem auf den Straßenverkehr fokussieren.**
- **Die wesentlichen Potentiale durch Minderung an der Quelle lassen sich im kommunalen Bereich aber nicht beeinflussen, sondern nur durch Änderung der Anforderungen im Rahmen der Typprüfung von Kfz. Und diese sind durch Europäische Gesetzgebung geregelt, können also nicht einmal auf nationaler Ebene verbessert werden.**
- **In diesem Bereich hat sich in den zurückliegenden Jahrzehnten die Effektivität von Minderungen im Rahmen der Typprüfung im Hinblick auf Minderungen im realen Straßenverkehr zunehmend verschlechtert.**
- **Herausragende Beispiele sind die Geräuschemissionen von Pkw generell und die NOx-Emissionen von Diesel-Pkw.**

# Einleitung



- **Im kommunalen Bereich verbleiben als Minderungsmaßnahmen neben Infrastruktur- und Planungsmaßnahmen im wesentlichen Maßnahmen, die Verkehrsaufkommen und –zusammensetzung sowie den Verkehrsablauf beeinflussen.**
- **In diesem Zusammenhang wurde Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen als eine Maßnahme zur Lärminderung vorgeschlagen und z.B. in Berlin auch bereits umgesetzt.**
- **In einigen anderen Städten wird diese Maßnahme aktuell diskutiert.**
- **Dieser Vortrag beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit Tempo 30 die CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen im Straßenverkehr im Vergleich zu Tempo 50 beeinflussen.**
- **Die Darstellung wird auf Diesel-Pkw sowie NO<sub>x</sub>-Emissionen bzw. Kraftstoffverbrauch/CO<sub>2</sub>-Emissionen beschränkt.**

# Grundlagen



- Die im folgenden dargestellten Zusammenhänge und Ergebnisse basieren im wesentlichen auf PEMS-Messungen und PHEM-Analysen aus Untersuchungen in Stuttgart, die in [1] und [2] ausführlich beschrieben sind.
- Im Rahmen von [1] wurde in Stuttgart das Abgasemissionsverhalten von zwei Pkw und einem leichten Nutzfahrzeug im realen Straßenverkehr auf unterschiedlichen Strecken erfasst.
- Auf 3 Hauptverkehrsstraßenabschnitten wurde zudem das Fahrverhalten bei Tempolimiten von 40 km/h und 30 km/h simuliert.
- Der Vergleich ist durch Vielfalt an Parametern erschwert, z.B. Stillstandsanteile.
- Die Auswertung hat gezeigt, dass die Fahrstrecken zur Ableitung von Parametereinflüssen lang genug ( $\geq 2$  km) gewählt werden müssen, um Artefakte zu vermeiden.

# Einflussparameter für CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>

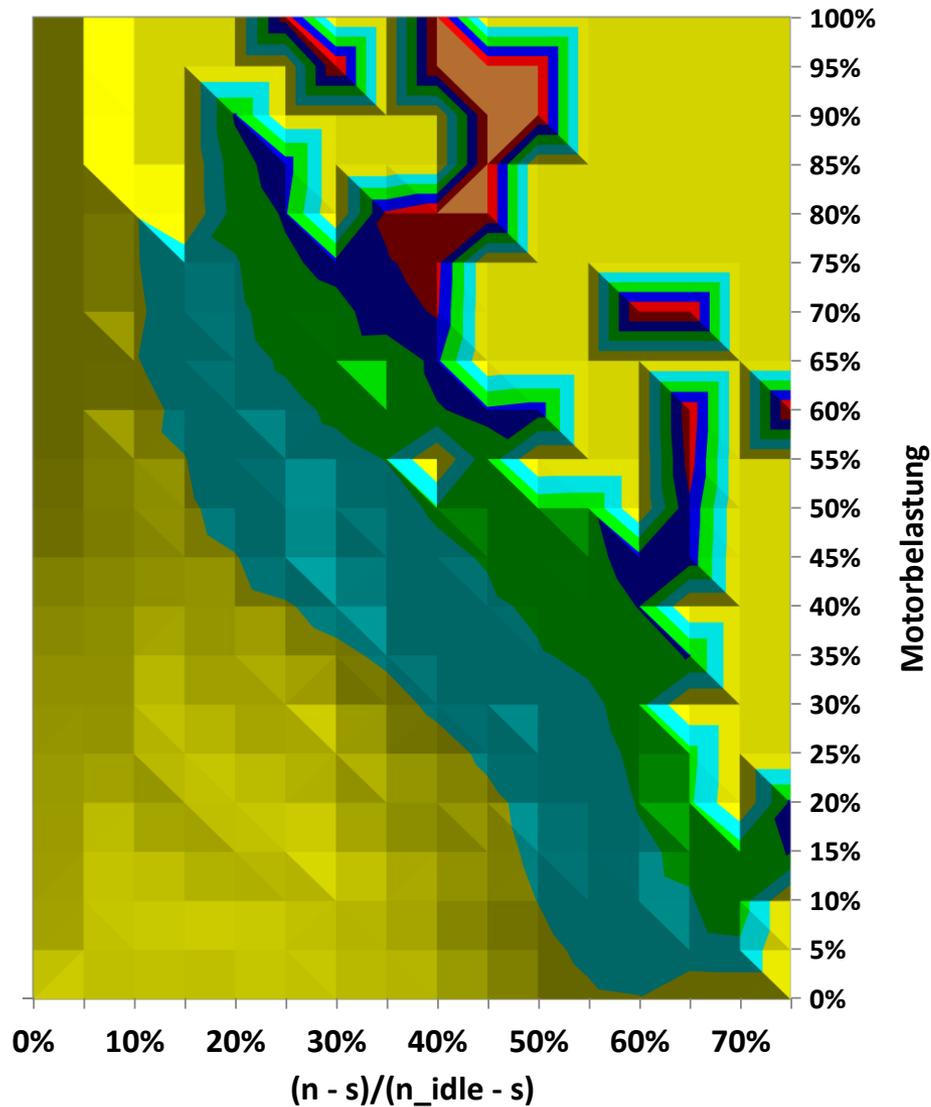
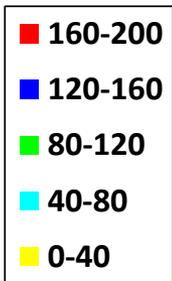


- Nähere Einzelheiten zum PHEM-Modell, das auch für die Bestimmung der Emissionsfaktoren des Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEfa 3.1) benutzt wurde, findet man in [3]. Mit derselben Thematik beschäftigt sich auch eine Untersuchung der Firma Aviso (siehe [4]).
- Die Emissionen eines Kfz hängen primär von Motordrehzahl und Motorbelastung ab. Bild 1 zeigt beispielhaft ein Kennfeld für NO<sub>x</sub>, das aus den Ergebnissen der PHEM-Modellierung für Euro 4 Diesel Pkw mit DPF (Partikelfilter) gewonnen wurde.
- Die Emissionen in g/h nehmen mit Motordrehzahl und Motorbelastung zu.
- Die Zusammenhänge für CO<sub>2</sub> sind ähnlich, die Zusammenhänge für NO<sub>x</sub> für Pkw mit Abgasnachbehandlung können komplexer sei, je nachdem, wie die Regelung des Abgasnachbehandlungssystems ausgelegt ist. Dies hängt nicht nur von der Eurostufe ab, sondern auch von Hersteller und Typ.

# NOx-Kennfeld eines Diesel Pkw



Diesel Pkw, Euro 4 mit DPF,  
NOx Emissionen in g/h

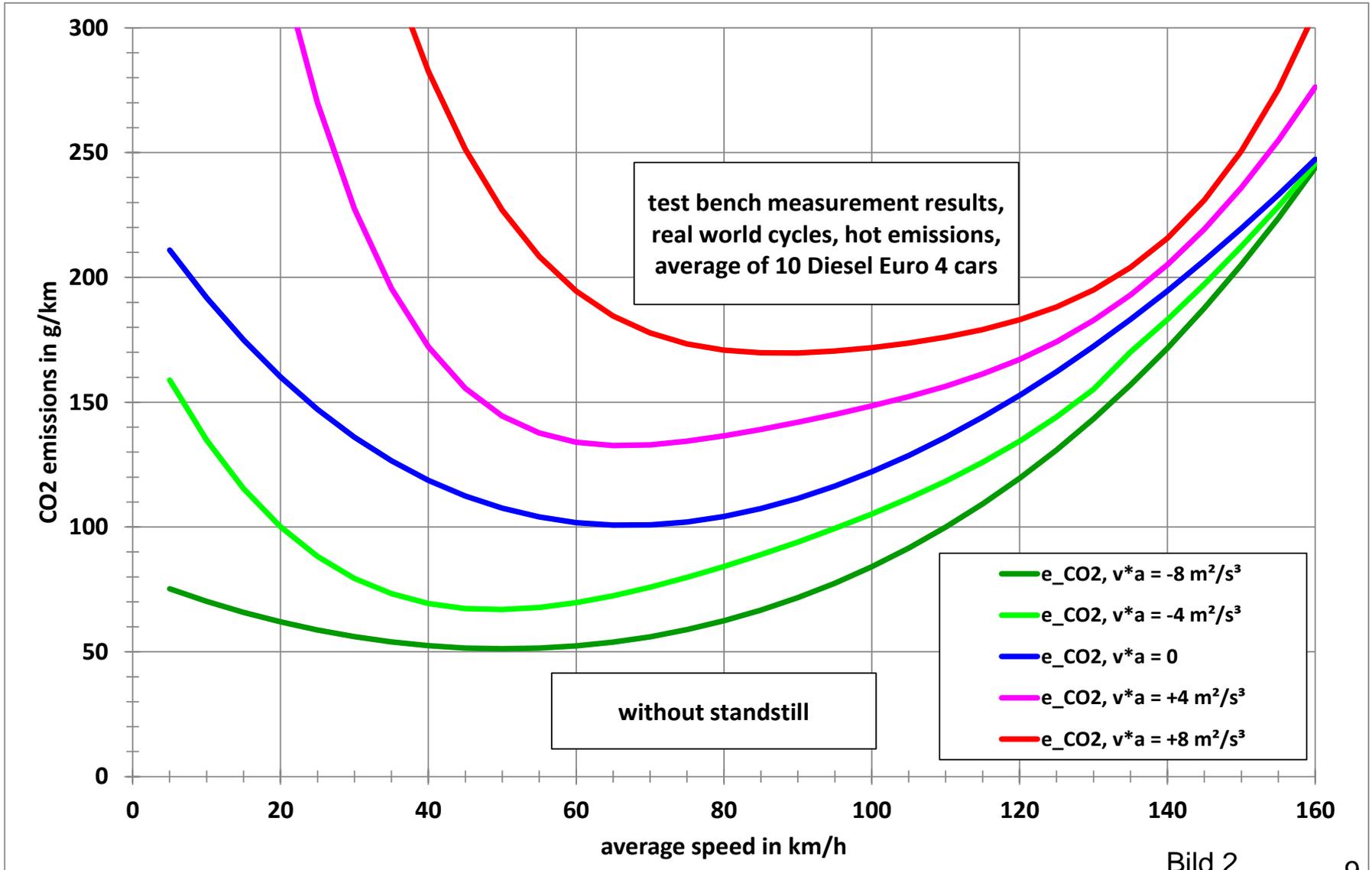


# Einflussparameter für CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>



- Für die praktische Anwendung sind Kennfelder in Abhängigkeit von fahrprofilabhängigen Parametern geeigneter. Bild 2 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Emissionen einer Stichprobe von Diesel-Pkw von  $v$  (Geschwindigkeit) und  $v \cdot a$  (Geschwindigkeit \* Beschleunigung).
- Die Zusammenhänge für NO<sub>x</sub> sind ähnlich.
- Die blaue Kurve in Bild 2 zeigt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei konstanter Geschwindigkeit. Die niedrigsten Emissionen stellen sich zwischen 60 und 75 km/h ein.
- Bei niedrigeren Geschwindigkeiten nehmen die Emissionen mit abnehmender Geschwindigkeit zu, bei höheren Geschwindigkeiten mit zunehmender Geschwindigkeit.

# CO2-Emission in g/km als $f(v, v^*a)$

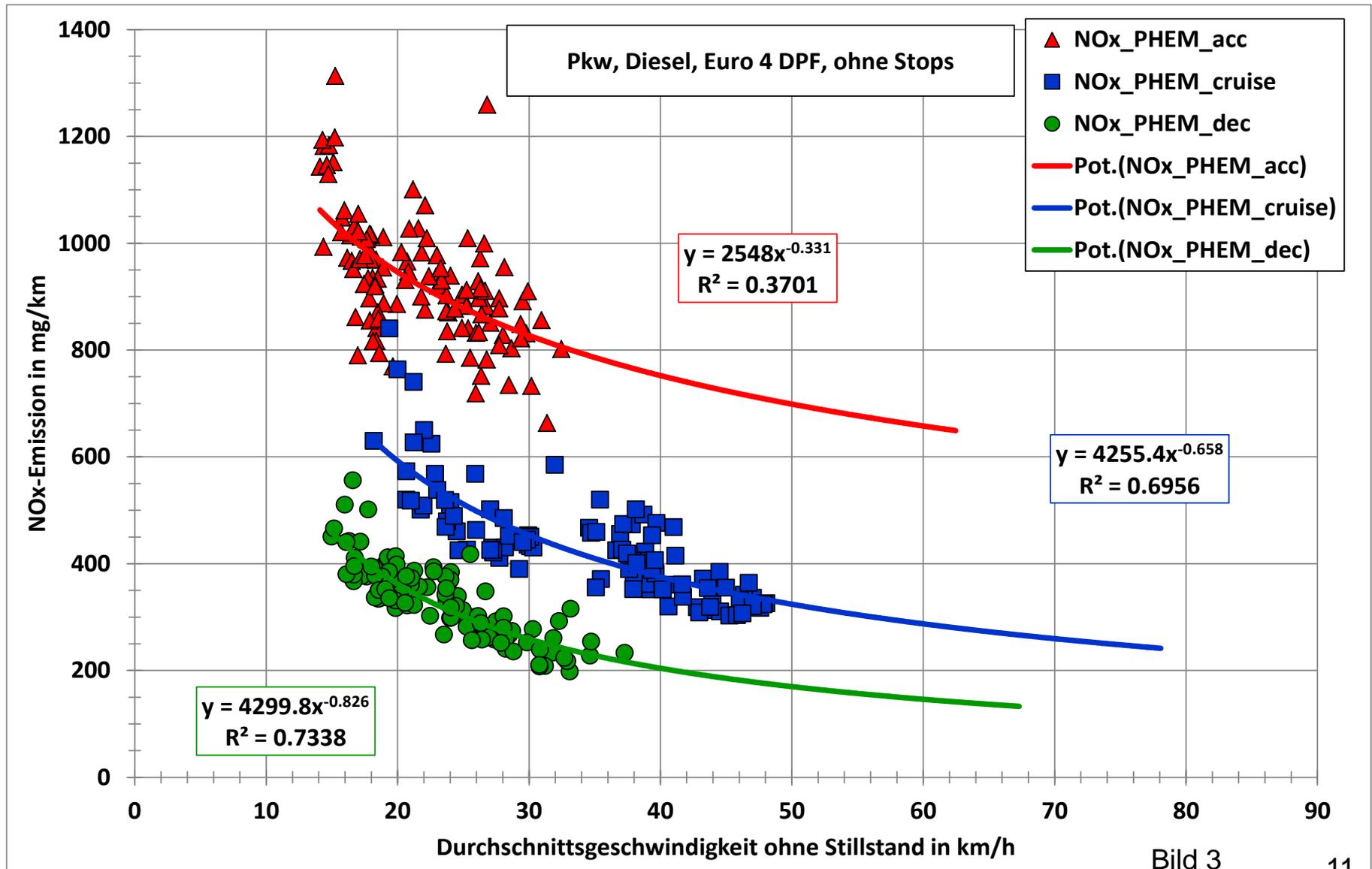


# CO<sub>2</sub>-Emission in g/km als $f(v, v^*a)$



- Letzteres ist auf die überproportional zunehmenden Fahrwiderstandsleistungen zurückzuführen, ersteres auf die Tatsache, dass die Emissionen in g/h mit sinkender Geschwindigkeit weniger stark abnehmen als die zurückgelegten Wegstrecken.
- Man sieht aber auch den enormen Einfluss von  $v^*a$ , das die massenspezifische Beschleunigungsleistung repräsentiert.
- Zudem ist die Lage der Minima hinsichtlich der Geschwindigkeit von  $v^*a$  abhängig. Sie verschiebt sich mit zunehmendem  $v^*a$  zu höheren Werten hin.
- Die Ergebnisse der PHEM-Modellierung aus [2] bestätigen diesen Sachverhalt (Bild 3). Die z.T. recht beträchtlichen Streuungen sind darauf zurückzuführen, dass die Beschleunigungen variieren und dass zusätzliche Einflüsse, wie Fahrbahnlängsneigung nicht ausreichend eliminiert werden konnten.

# NOx als f(v, Beschleunigungsklasse)



# Modellhafte Betrachtung der Einflussgrößen



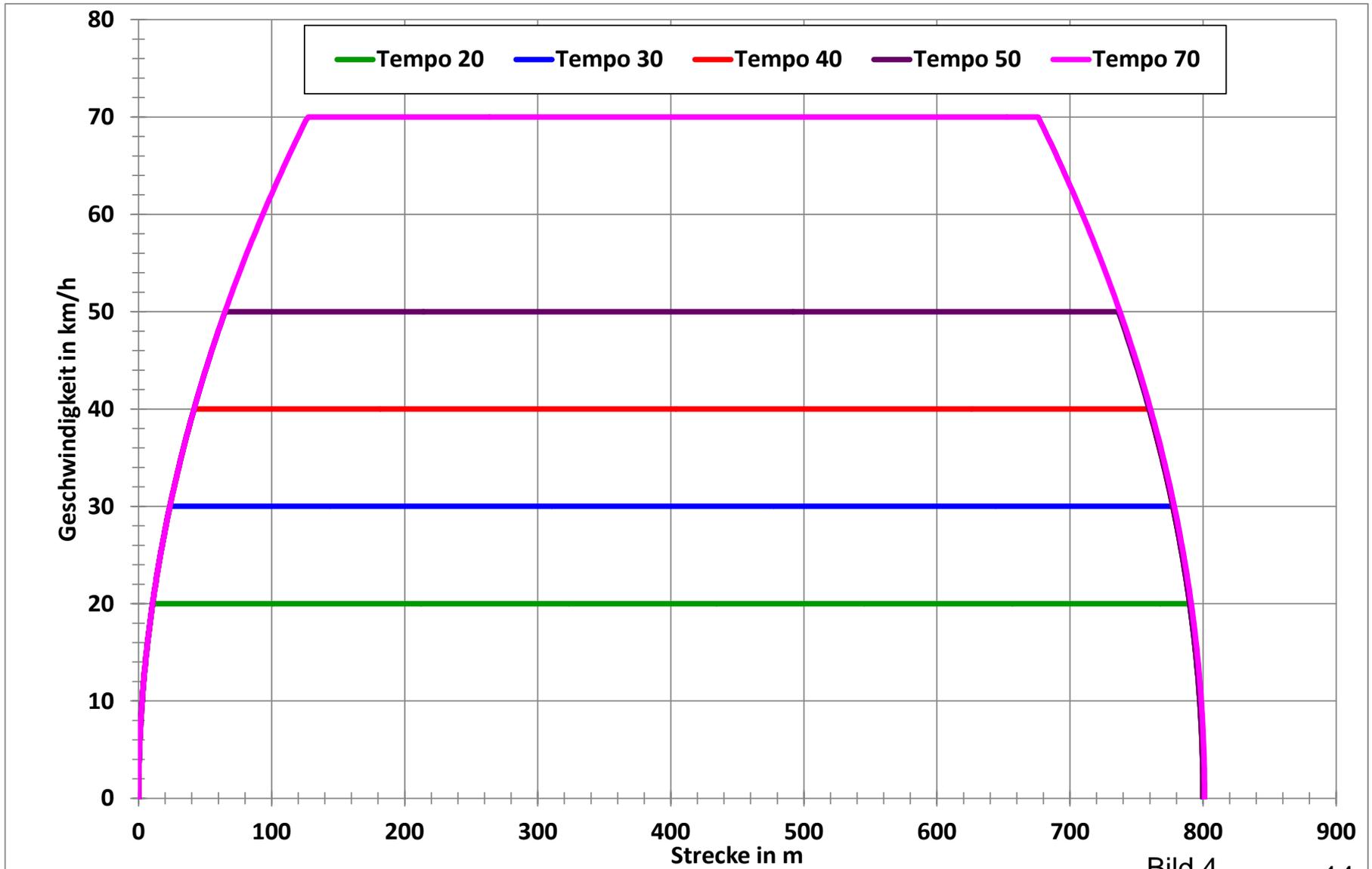
- Die sich ergebenden Regressionslinien können aber für die folgenden Modellbetrachtungen herangezogen werden.
- Die bisher dargestellten Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass die Emissionen am niedrigsten sind, wenn auf relativ hohem Geschwindigkeitsniveau (70 km/h) mit möglichst hohem Konstantfahrtanteil gefahren werden kann.
- Die Geschwindigkeits-Zeitverläufe, die man im realen Verkehr auf innerstädtischen Straßen registrieren kann, sind zumeist aber komplexer strukturiert, abhängig von Straßentyp, Tempolimit, Verkehrsaufkommen und –zusammensetzung.
- Dadurch wird die Beurteilung des Einflusses eines einzelnen Parameters, wie z.B. der Zielgeschwindigkeit, erschwert. Letztere ist zwar mit dem Tempolimit korreliert, die Korrelation hängt aber wiederum von Randbedingungen wie Befolgungsgrad, Überwachung u.ä. ab.

# Modellhafte Betrachtung der Einflussgrößen



- Um die Auswirkung verschiedener Tempolimits auf die Emissionen anschaulich und besser verständlich zu machen, werden ein Beschleunigungsvorgang bis auf die Zielgeschwindigkeit (gleich Tempolimit), eine anschließende Konstantfahrt und ein Verzögerungsvorgang (analog zum Beschleunigungsvorgang) für eine gegebene Streckenlänge und folgende Tempolimits betrachtet:
  - 20, 30, 40, 50 und 70 km/h
- Bei einer konstanten Beschleunigung von  $1,5 \text{ m/s}^2$  (Verzögerung  $-1,5 \text{ m/s}^2$ ) und einer Streckenlänge von 800 m ergeben sich die in Bild 4 dargestellten Verläufe.
- Mit den Regressionskurven der NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Bild 3 erhält man die in Tabelle 1 und Bild 5 zusammengestellten Ergebnisse.
- Bild 6 zeigt den Einfluss der Beschleunigung.

# Modellierte Geschwindigkeitsverläufe

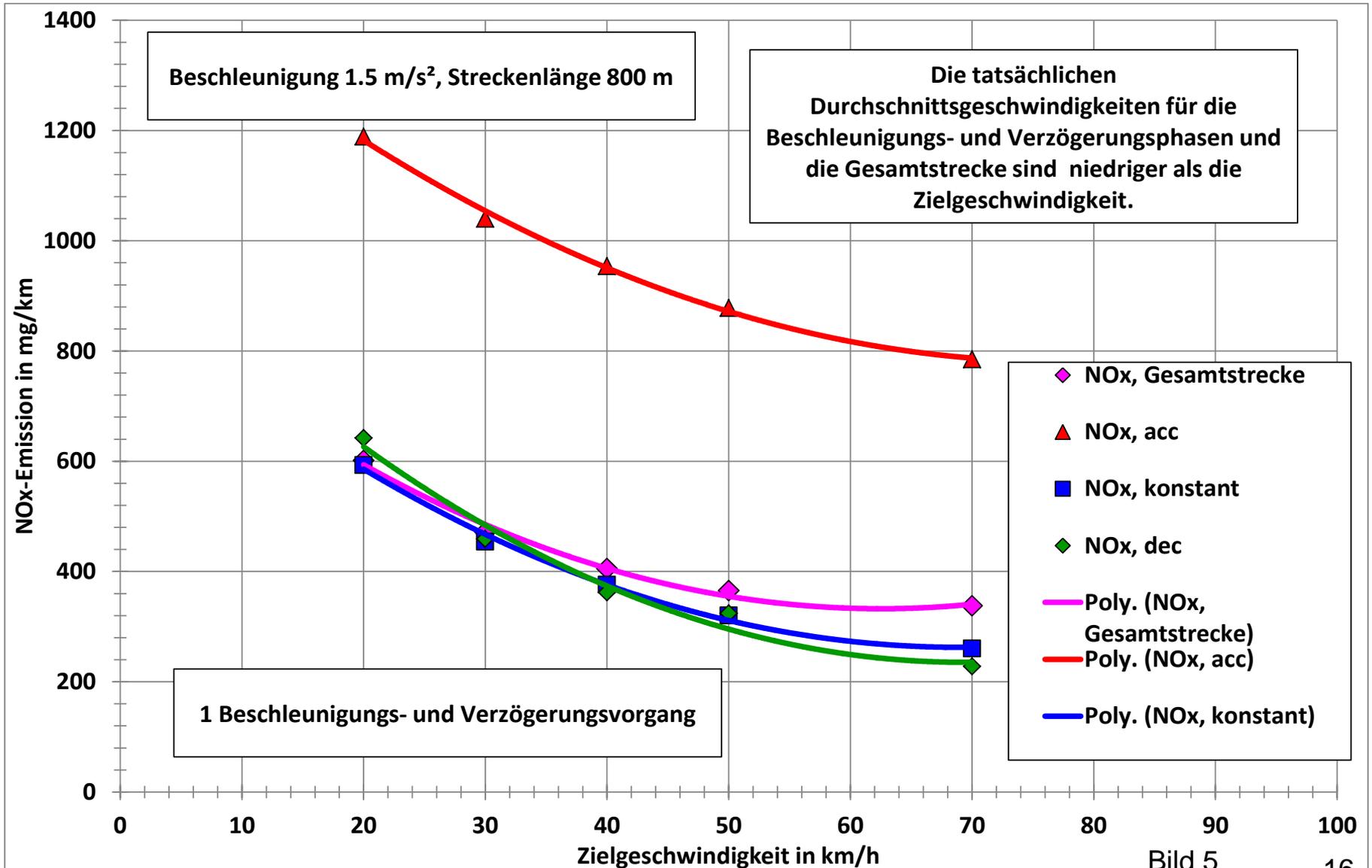


# Ergebnisse einsch. NOx

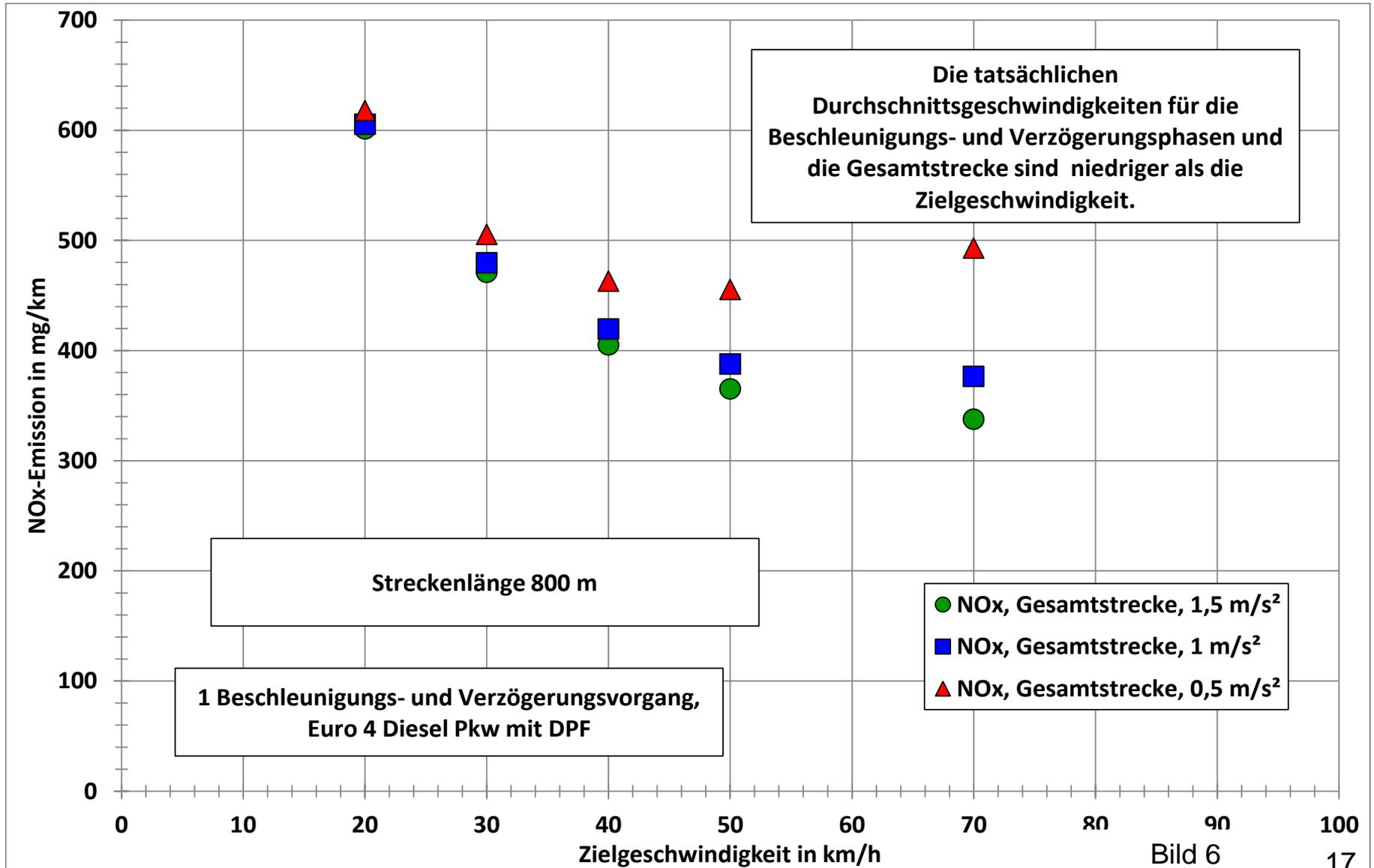


	Zielgeschwindigkeit = Höchstgeschwindigkeit in km/h												
	20				30				40				
	acc	konst	dec	Summe	acc	konst	dec	Summe	acc	konst	dec	Summe	
Zeit in s	3.7	140.3	3.70	147.7	5.6	90.4	5.6	101.6	7.4	64.6	7.4	79.4	
Weg in m	10.3	779.4	10.29	800.0	23.1	753.7	23.1	800.0	41.2	717.7	41.2	800.0	
v_ave in km/h	10.0	20.0	10.0	<b>19.5</b>	15.0	30.0	15.0	<b>28.4</b>	20.0	40.0	20.0	<b>36.3</b>	
NOx in mg/km	1189	593	642	<b>601.3</b>	1040.0	454.0	459.0	<b>471.1</b>	954.0	376.0	362.0	<b>405.0</b>	
NOx in mg	12.2	462.2	6.6	<b>481.0</b>	24.1	342.2	10.6	<b>376.9</b>	39.3	269.9	14.9	<b>324.0</b>	
	Zielgeschwindigkeit = Höchstgeschwindigkeit in km/h												
	50				70								
	acc	konst	dec	Summe	acc	konst	dec	Summe	Strecke in m		800		
Zeit in s	9.3	48.3	9.3	66.9	13.0	28.2	13.0	54.1	Beschleunigung in m/s <sup>2</sup>		1.5		
Weg in m	64.3	671.4	64.3	800.0	126.0	547.9	126.0	800.0					
v_ave in km/h	25.0	50.0	25.0	<b>43.1</b>	35.0	70.0	35.0	<b>53.2</b>					
NOx in mg/km	878.0	320.0	324.0	<b>365.2</b>	785.0	260.0	228.0	<b>337.7</b>					
NOx in mg	56.5	214.8	20.8	<b>292.1</b>	98.9	142.5	28.7	<b>270.1</b>					

# Nox = f(v\_ziel, Fahrzustand)



# Nox = f(v\_ziel, a)

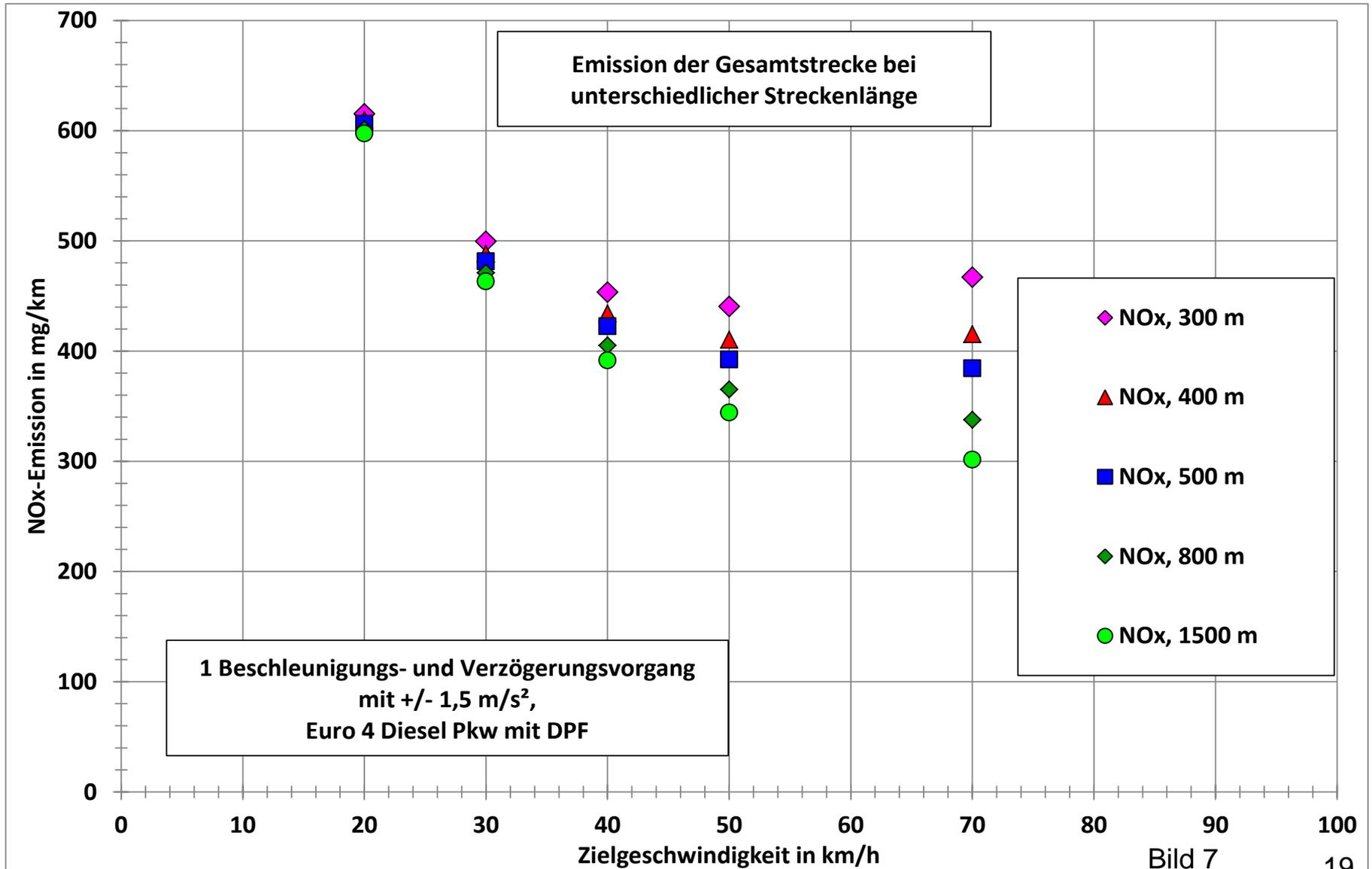


# Modellhafte Betrachtung der Einflussgrößen

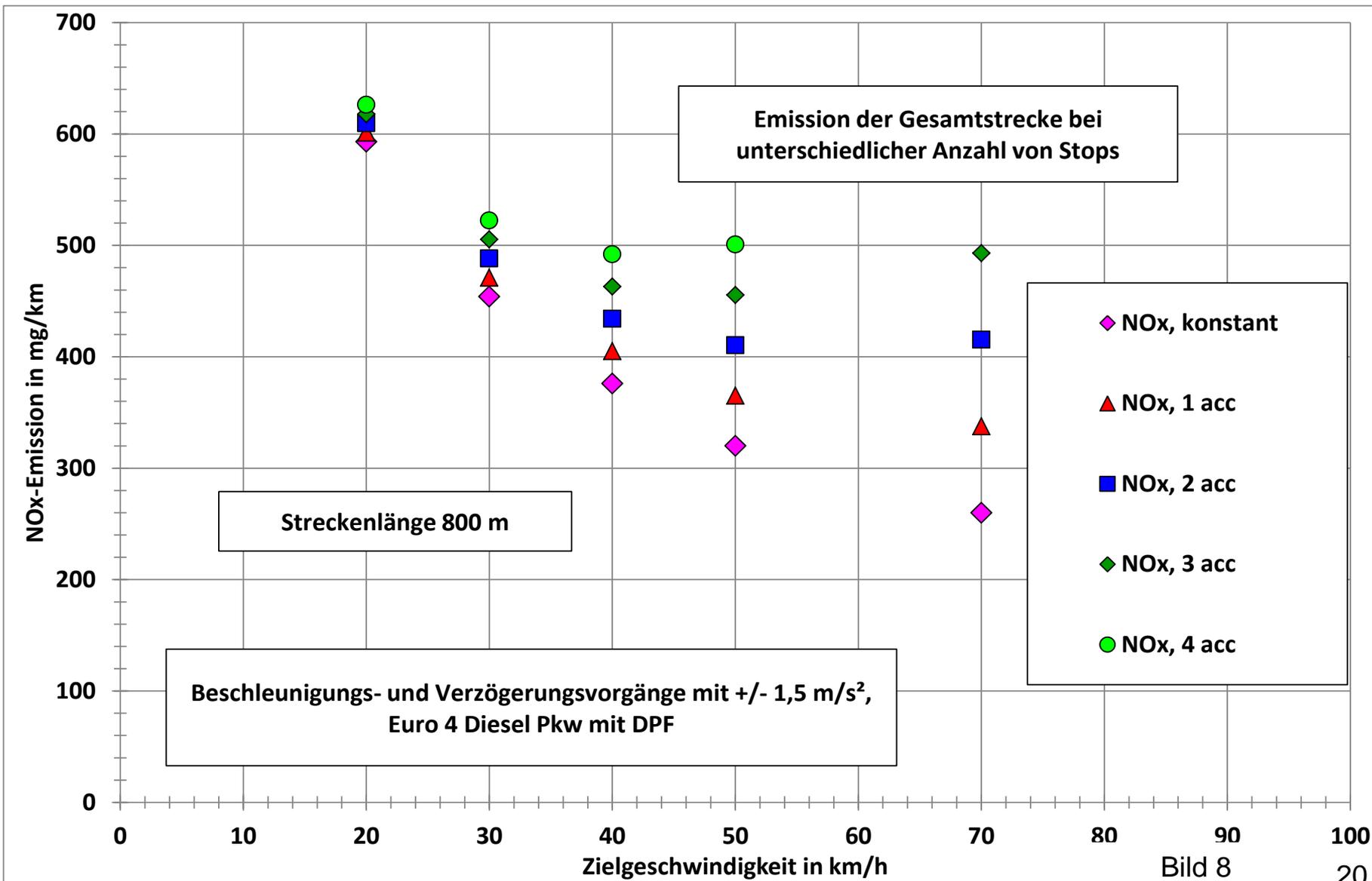


- Diese sind eindeutig: Die niedrigsten Emissionen ergeben sich bei Zielgeschwindigkeiten von 50 bis 70 km/h.
- Bild 7 zeigt die Ergebnisse für die Gesamtstrecke bei unterschiedlicher Streckenlänge. Bei 300 m Länge ist Tempo 70 ungünstiger als Tempo 50, weil der Konstantfahrtanteil nahezu Null ist.
- Bild 8 zeigt die Ergebnisse für die Gesamtstrecke bei unterschiedlicher Anzahl von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen für eine Streckenlänge von 800 m. 4 Beschleunigungsvorgänge sind bei Tempo 70 nicht mehr möglich.
- Bild 9 ist analog zu Bild 8, die Streckenlänge beträgt aber 500 m. In diesem Fall sind 4 Beschleunigungsvorgänge bereits bei Tempo 50 und 3 bei Tempo 70 nicht mehr möglich.

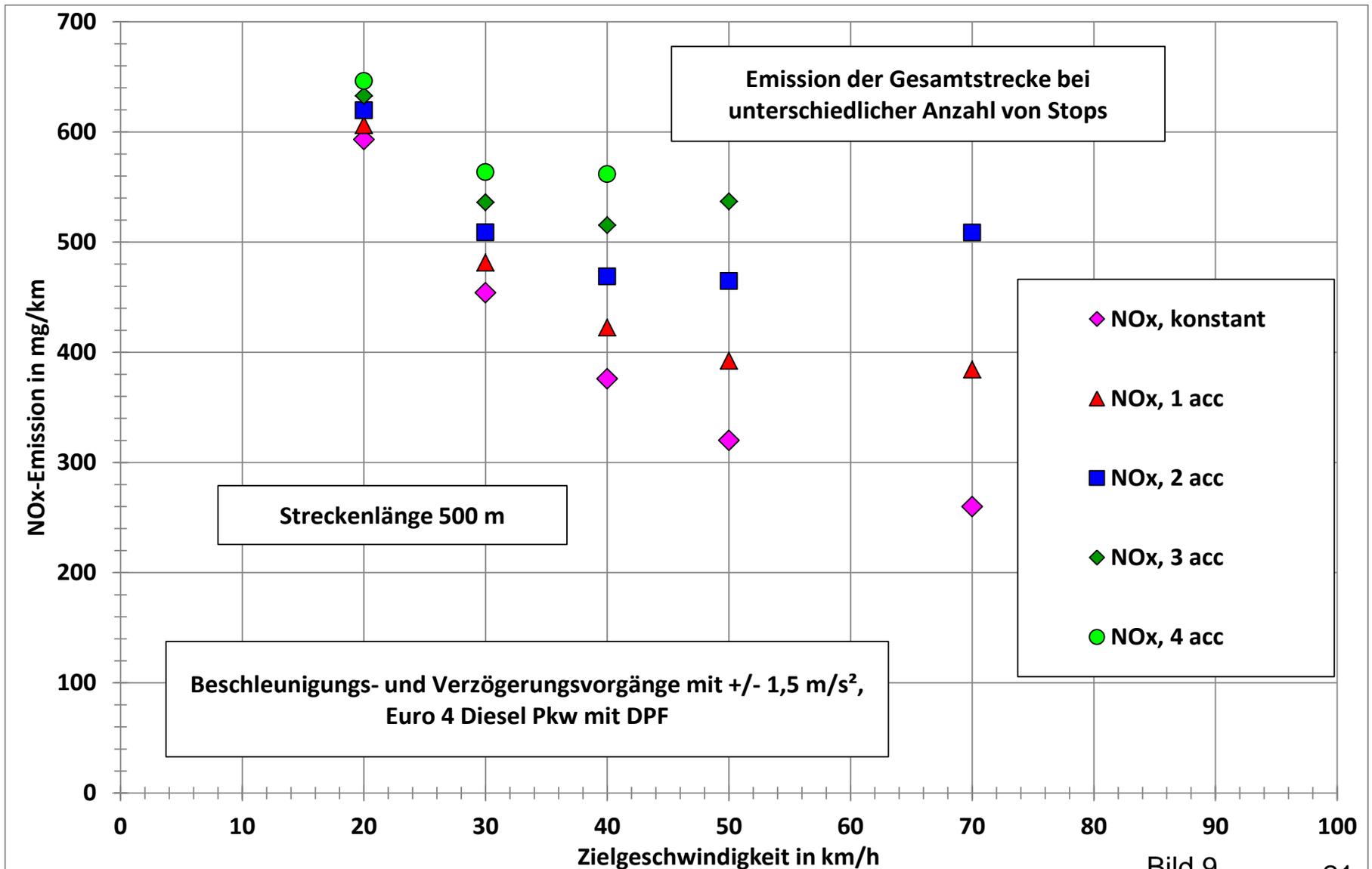
# Variation der Streckenlänge



# Variation der Anzahl von Beschleunigungsvorgängen



# Variation der Anzahl von Beschleunigungsvorgängen

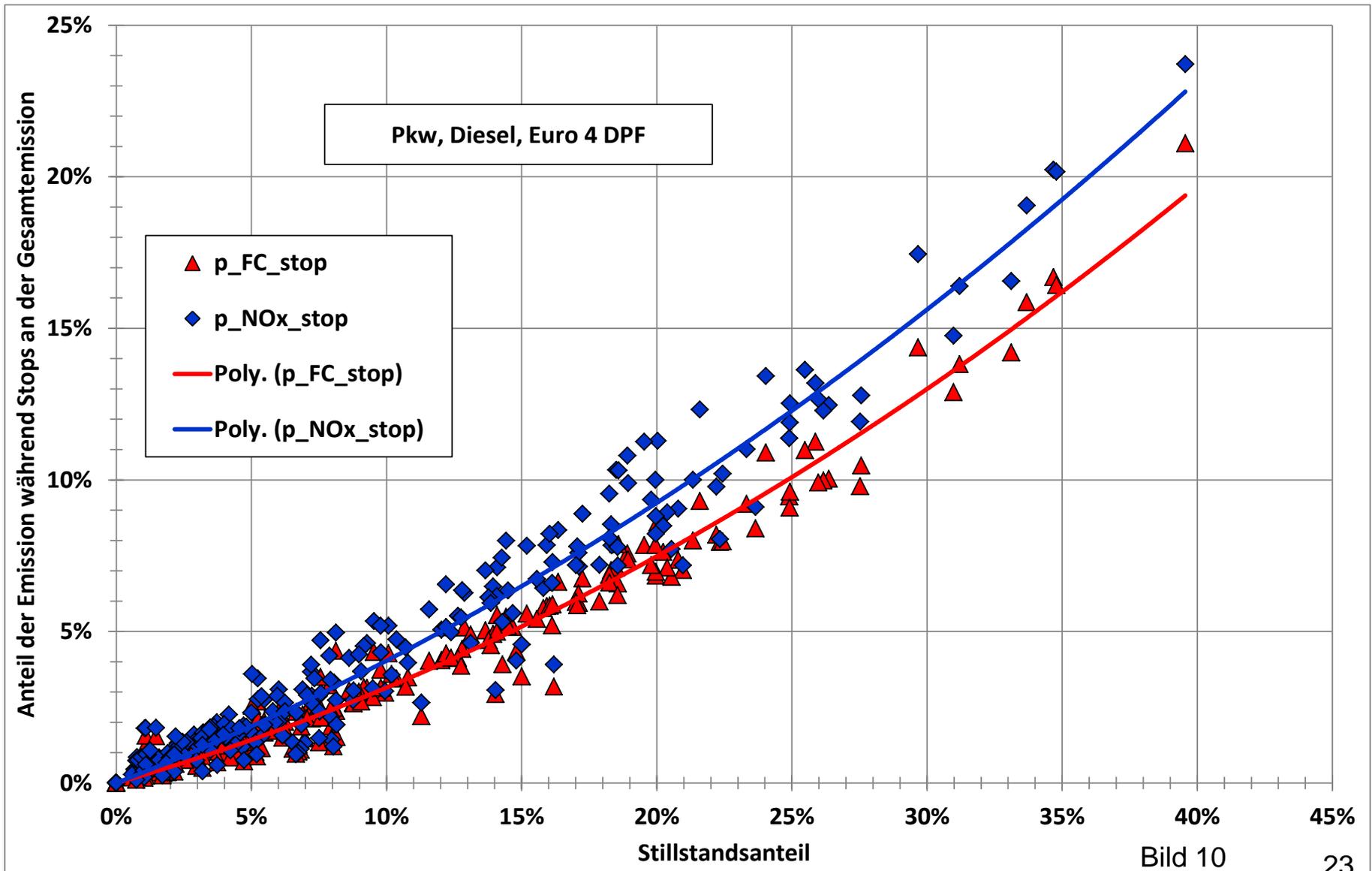


# Einfluss von Stillstandsanteilen



- **Die bisherigen Ergebnisse beinhalteten keine Stillstandsanteile. Diese kommen im realen Innerortsverkehr jedoch z.T. in beträchtlichem Umfang vor.**
- **Aus den Analysen in [2] ließen sich deren Anteile an den Gesamtemissionen mit guter Korrelation bestimmen. Die Ergebnisse sind in Bild 10 dargestellt. FC bedeutet Kraftstoffverbrauch und ist direkt proportional zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen.**
- **Bei 25% Stillstandsanteil beträgt der Anteil an den CO<sub>2</sub>-Emissionen 12% und an den NO<sub>x</sub>-Emissionen immerhin 10%.**

# Einfluss von Stillstandsanteilen



# Ergebnisse von Fahrverhaltensuntersuchungen in Stuttgart



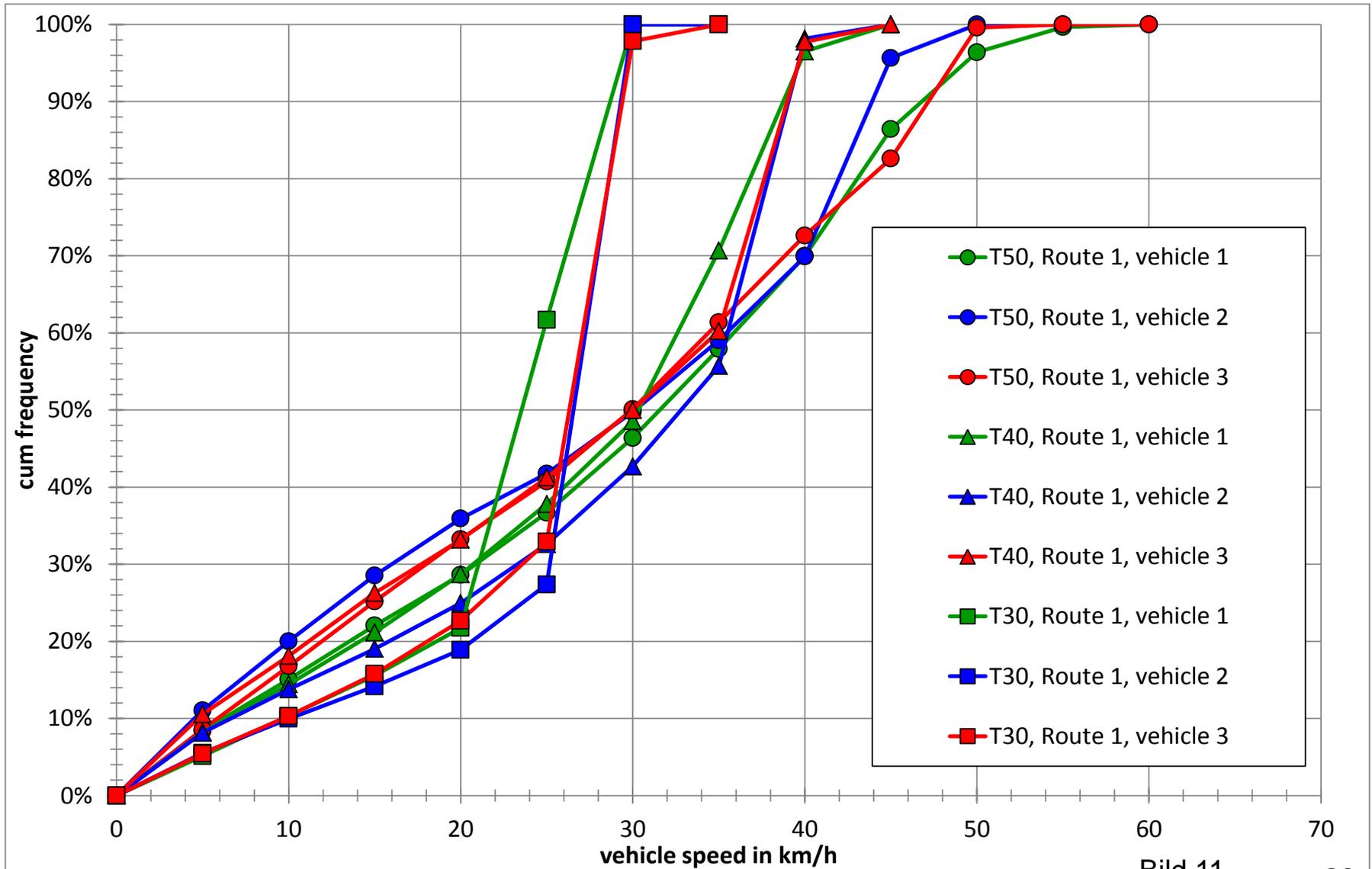
- Wie schon erwähnt, wurde im Rahmen von [1] in Stuttgart das Abgasemissionsverhalten von zwei Pkw und einem leichten Nutzfahrzeug im realen Straßenverkehr auf unterschiedlichen Strecken mittels PEMS (on board permanent emission measurement system) erfasst, wobei zudem auf 3 Hauptverkehrsstraßenabschnitten das Fahrverhalten bei Tempolimiten von 40 km/h und 30 km/h simuliert wurde.
- Die Simulation war insofern nicht ganz stimmig, weil die reduzierten Tempolimiten strikt beachtet wurden und das Versuchsfahrzeug bei Tempo 30 und Tempo 40 eher mehr freie Fahrtanteile aufwies als bei einem realistischeren Feldversuch, weil die vorausfahrenden Fahrzeuge natürlich deutlich höhere Zielgeschwindigkeiten anstrebten.
- Die Fahrten wurden zu unterschiedlichen Tageszeiten zwischen 6:00 h morgens und 20:00 h abends durchgeführt.

# Ergebnisse von Fahrverhaltensuntersuchungen in Stuttgart

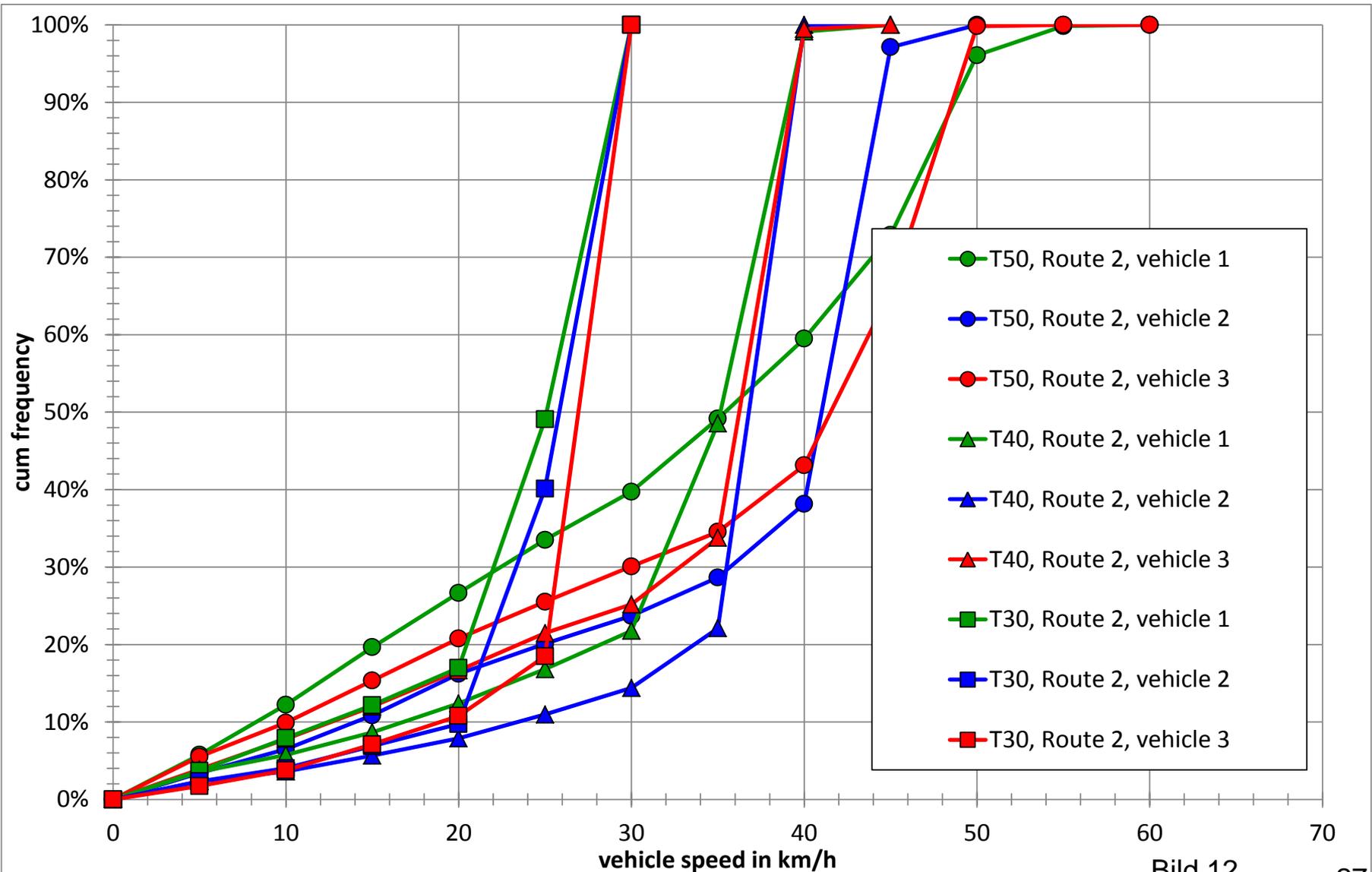


- Die über alle Messfahrten summierten, stillstandsbereinigten Geschwindigkeitsverteilungen sind in Bild 11 und Bild 12 dargestellt. Route 1 bedeutet Innenstadtring, Route 2 Neckartorstrecke.
- Route 2 hatte deutlich höhere Anteile mit Geschwindigkeiten nahe der Zielgeschwindigkeit. Außerdem ist zu erkennen, dass die Zielgeschwindigkeiten gut befolgt wurden.
- Kraftstoffverbräuche und NOx-Emissionen der einzelnen Versuchsfahrten sind in Bild 13 und Bild 14 (ebenfalls stillstandsbereinigt) dargestellt, um den Einfluss der Zielgeschwindigkeit besser herausarbeiten zu können.

# Geschwindigkeitsverteilungen

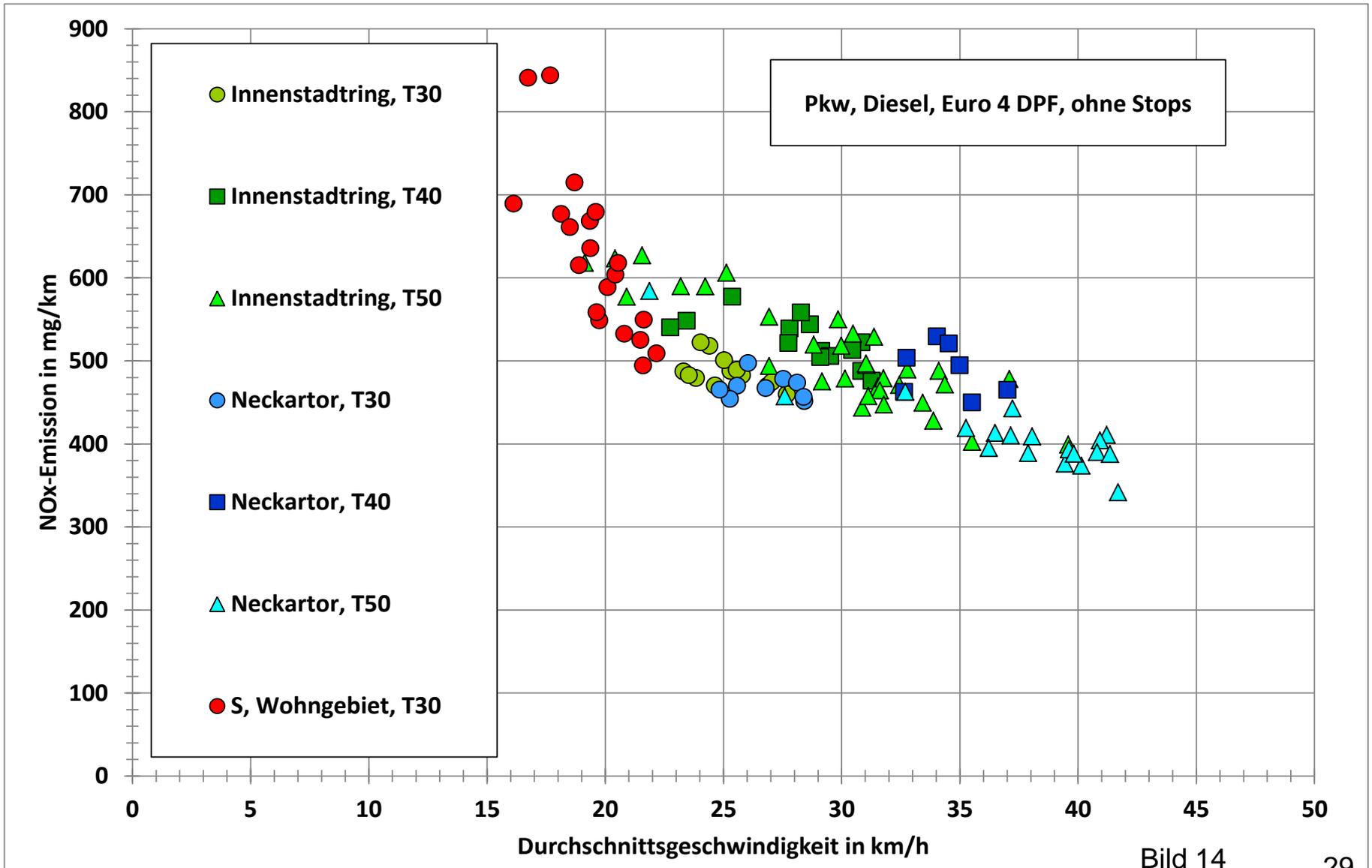


# Geschwindigkeitsverteilungen





# NOx-Emissionen

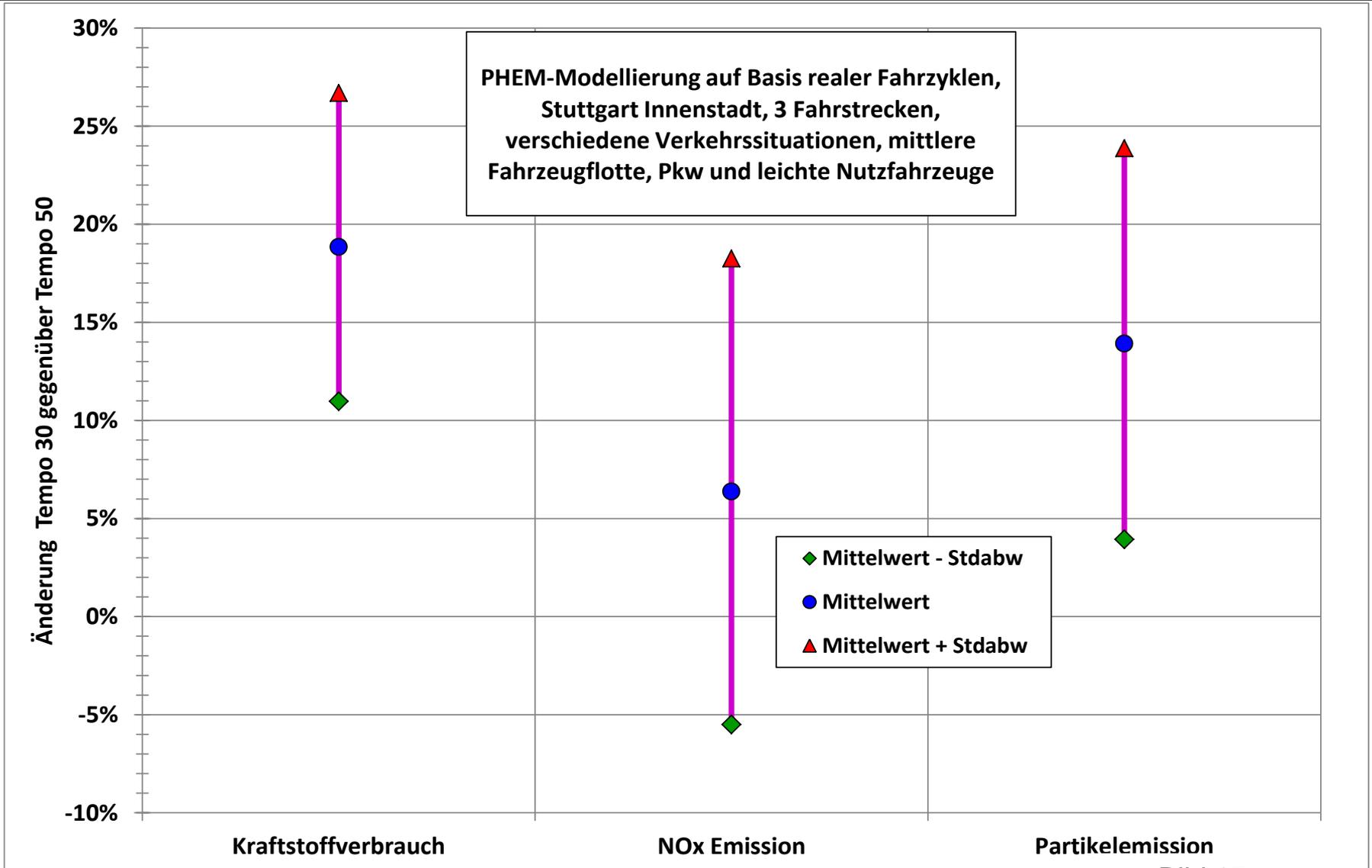


# Ergebnisse von Fahrverhaltensuntersuchungen in Stuttgart



- In Bild 13 und Bild 14 wurden zusätzlich die Ergebnisse von Wohngebietsstrecken mit Tempo 30 mit einbezogen.
- Der Einfluss der mittleren Geschwindigkeit ist eindeutig. Die höchsten Emissionen treten auf den Wohngebietsstrecken auf, die auch die niedrigsten Geschwindigkeiten aufweisen.
- Bild 15 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse für Kraftstoffverbrauch, NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen.
- Tempo 30 ergibt gegenüber Tempo 50 eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um ca. 19%, bei den Partikelemissionen beträgt die Erhöhung im Mittel 14%, bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen im Mittel 6%, wobei hier Minderungen nicht völlig ausgeschlossen sind.
- Diese Ergebnisse stehen in gutem Einklang mit den Ergebnissen der Modellberechnungen.

# Ergebnisse der Emissionsbestimmung



# Schlussfolgerungen



- Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass Tempo 30 selbst bei vollständigem Befolgungsgrad nur dann zu einer Minderung der NOx-Emissionen führt, wenn die Fahrverläufe im Ausgangszustand (bei Tempo 50) stark unstetig sind und wenn bei Tempo 30 eine deutliche Verstetigung und eine Herabsetzung der Stillstandsanteile erreicht werden können.
- Dies ist auf Hauptverkehrsstraßen im allgemeinen ohne eine deutliche Reduzierung des Verkehrsaufkommens nicht zu erreichen.
- Bei den CO2-Emissionen fällt die Erhöhung stärker aus als bei den NOx-Emissionen, eine Minderung der CO2-Emissionen durch Tempo 30 kann praktisch ausgeschlossen werden.

# Schlussfolgerungen



- Die Ergebnisse der Fahrverhaltensuntersuchungen mit anschließender PHEM-Modellierung von Kraftstoffverbrauch und NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen bestätigen die Ergebnisse der Modellberechnungen und zeigen ähnliche Trends bei den Partikelemissionen.
- Die Stillstandsanteile können Kraftstoffverbrauch und Emissionen erheblich beeinflussen. Die Anteile der Stopps an den Gesamtemissionen steigen überproportional mit den Stillstandsanteilen an und zwar bei NO<sub>x</sub> stärker als beim Kraftstoffverbrauch. Bei 25% Stillstandsanteil tragen die Stillstandsemissionen bei NO<sub>x</sub> ca. 12% zu den gesamten Emissionen und beim Kraftstoffverbrauch ca. 10% bei und zwar unabhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit.
- In die Analysen in [2] wurden auch schwere Nutzfahrzeuge mit einbezogen, die vorstehend geschilderten Schlussfolgerungen werden dadurch nicht verändert.

# Literatur



- [1] **Martin Kleinebrahm, Heinz Steven,**  
**Vermessung des Abgasemissionsverhaltens von zwei Pkw und einem Fahrzeug der Transporterklasse im realen Straßenbetrieb in Stuttgart mittels PEMS-Technologie, im Auftrag der LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg), März 2011,**
- [2] **Heinz Steven**  
**Weitergehende Auswertungen der PEMS-Messergebnisse aus Stuttgart und der darauf basierenden Berechnungsergebnisse mit dem Emissionsmodell PHEM, im Auftrag der LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg), November 2011,**



- [3] Michael Zallinger,**  
**Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personen-**  
**kraftfahrzeugen, Dissertation an der Technischen Universität**  
**Graz, März 2010**
- [4] Nicola Toenges-Schuller, Christiane Schneider, Arnold**  
**Niederau**  
**Ersteinschätzung der Wirkung von T30 auf Hauptverkehrs-**  
**straßen auf die NOx- und PM10-Emissionen, im Auftrag der**  
**LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und**  
**Naturschutz Baden-Württemberg), Juni 2012.**