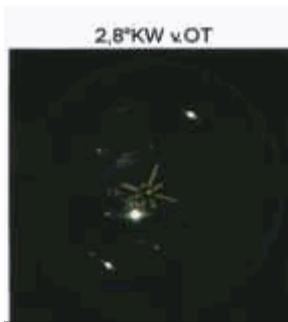
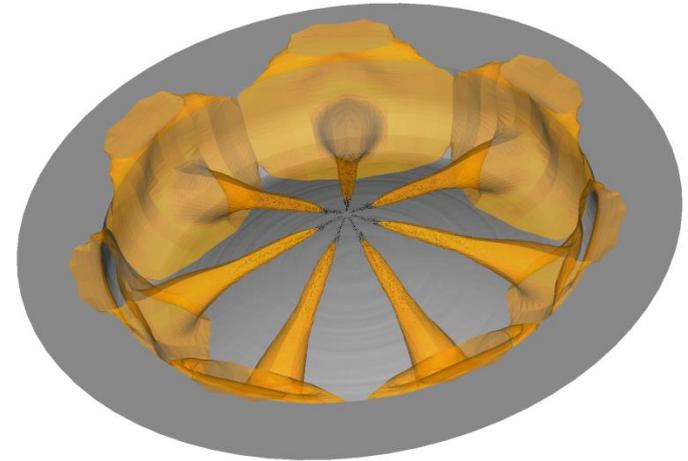


Der Dieselmotor - Stand der Technik und Entwicklungen in der Perspektive zukünftiger Fahrzeugantriebe

Dr. Amin Velji



**Sichtbar gemacht durch
einen Glaskolben in
einem Einzylinder-LKW-
Motor**



3D-Simulation mit KIVA code

**Arbeitskreis Energie (AKE) in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Herbstsitzung**

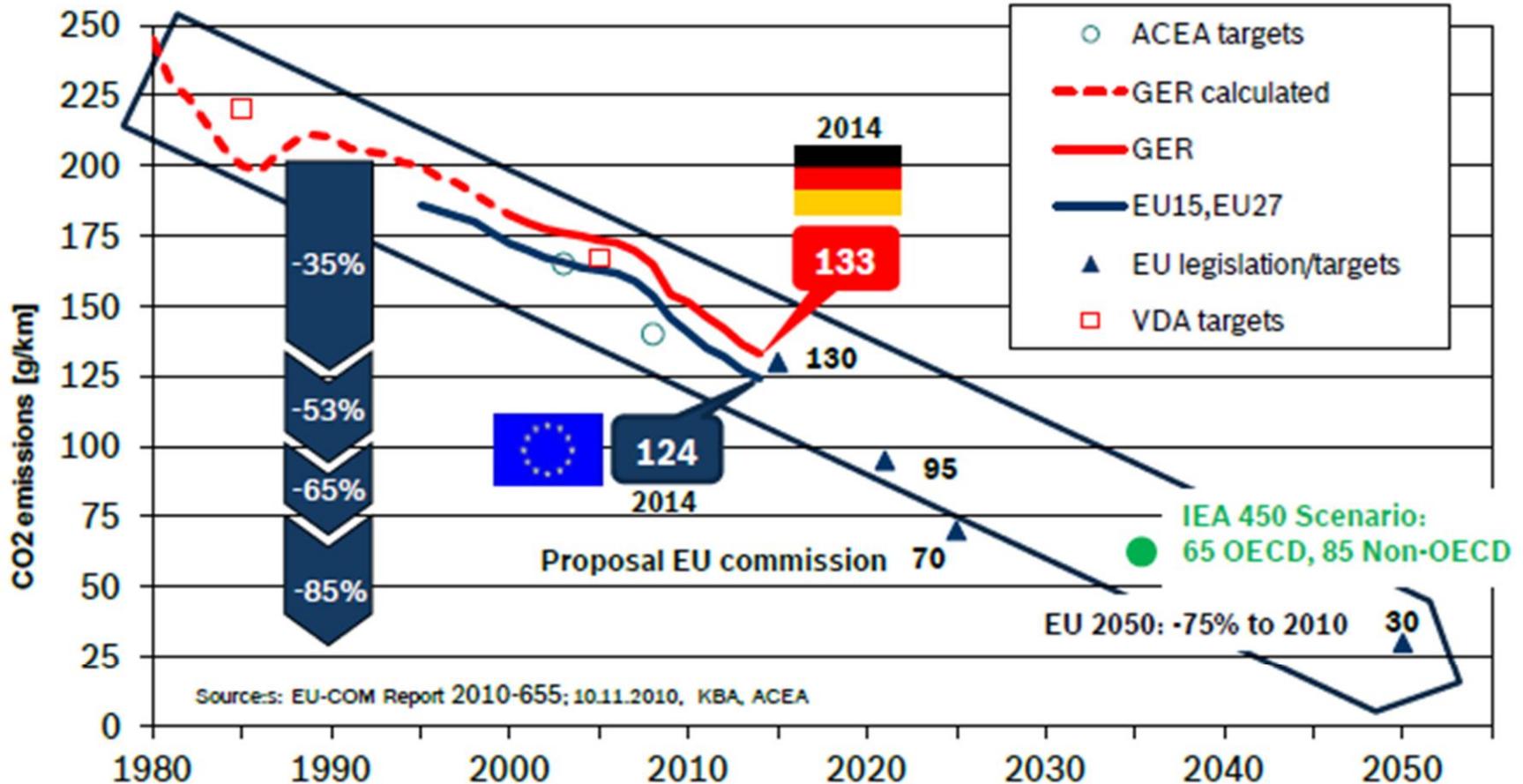
Bad Honnef, 20. und 21. Oktober 2016

INHALT

- **Einleitung**
- **NO_x-Emission**
- **Maßnahmen zur Reduktion der Abgasemission**
- **Ausblick Energiewende**
- **Zusammenfassung**

EINLEITUNG

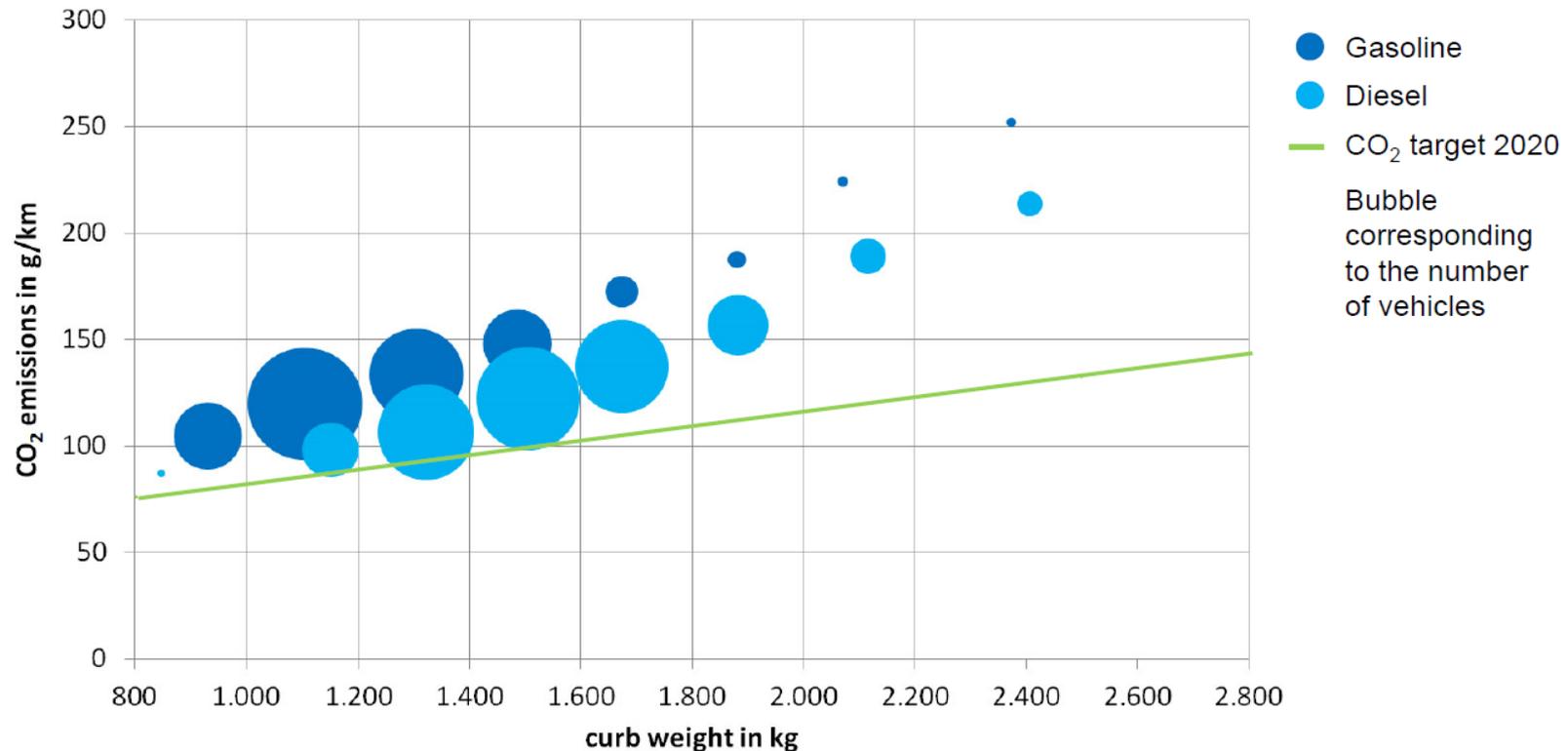
CO₂ emission of new released cars EU28 and Germany



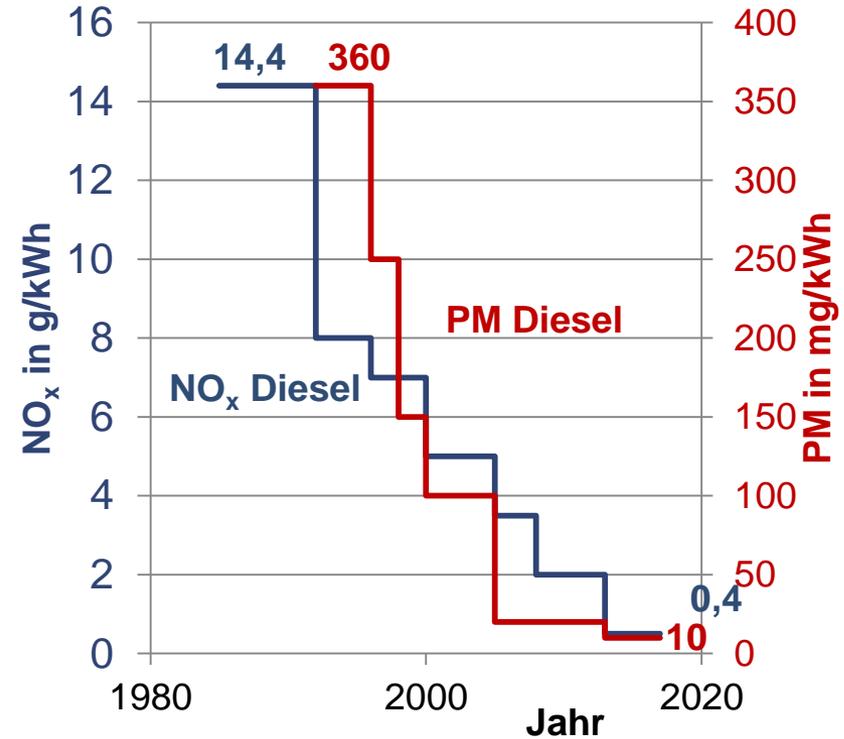
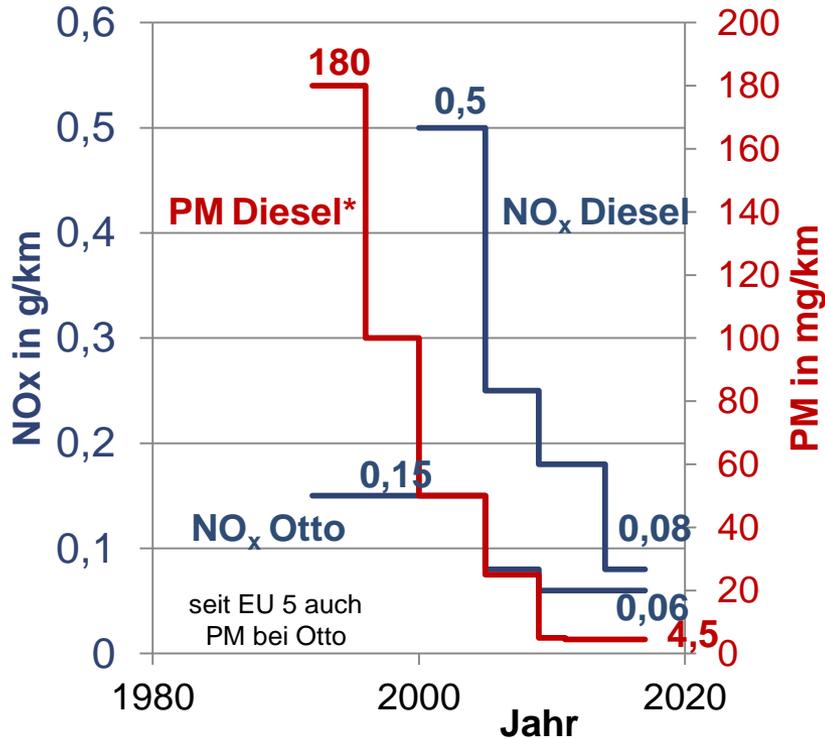
1980 - 2015: -110g /-48% !

2015 - 2050: - 90g /-75% !?

CO₂ Emissions: New Car Registrations in Europe (2013)



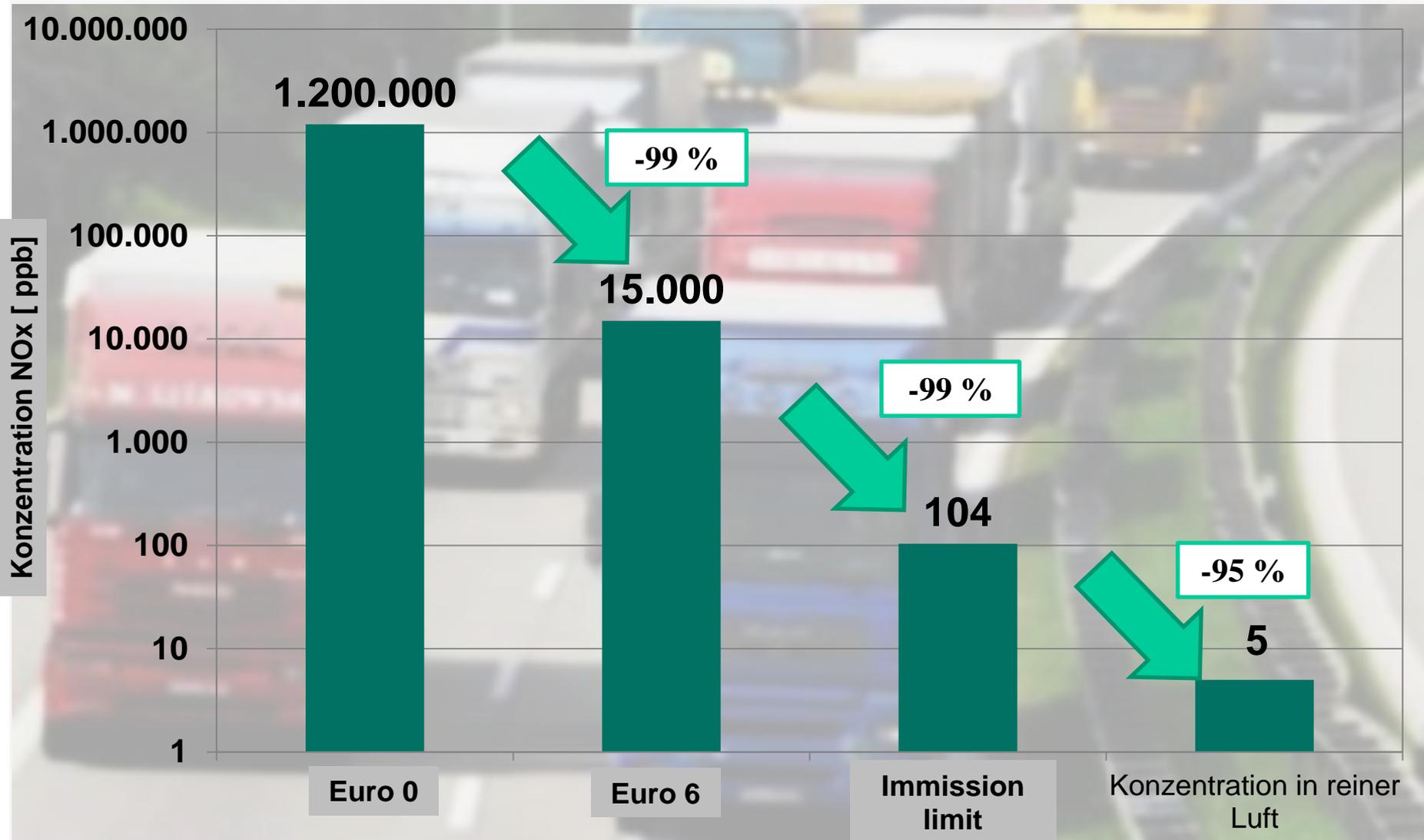
Quelle: Krämer, L.; MinNOx Conference, Berlin 2014



- Signifikante Reduktion der Emissionsgrenzen erfolgte in 25 Jahren.

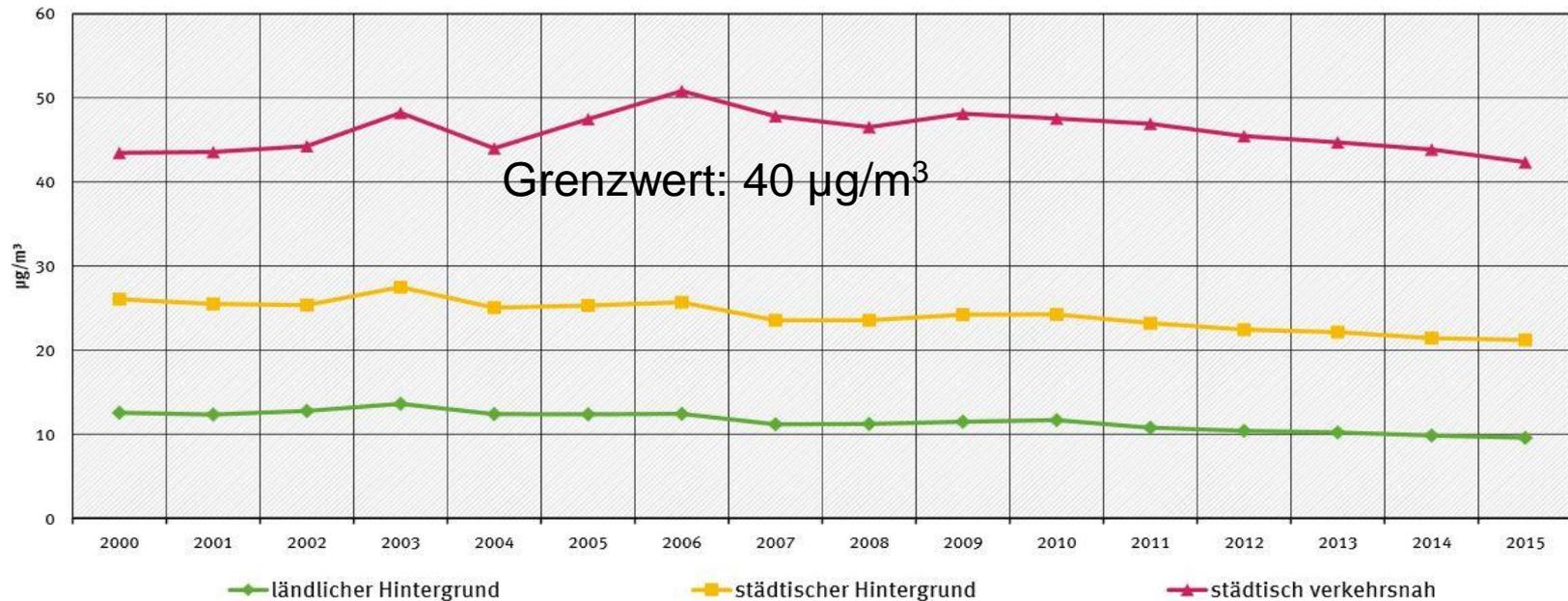
Quelle: europa.eu

Eindrucksvolle Reduktion der Diesel-NO_x- Emission



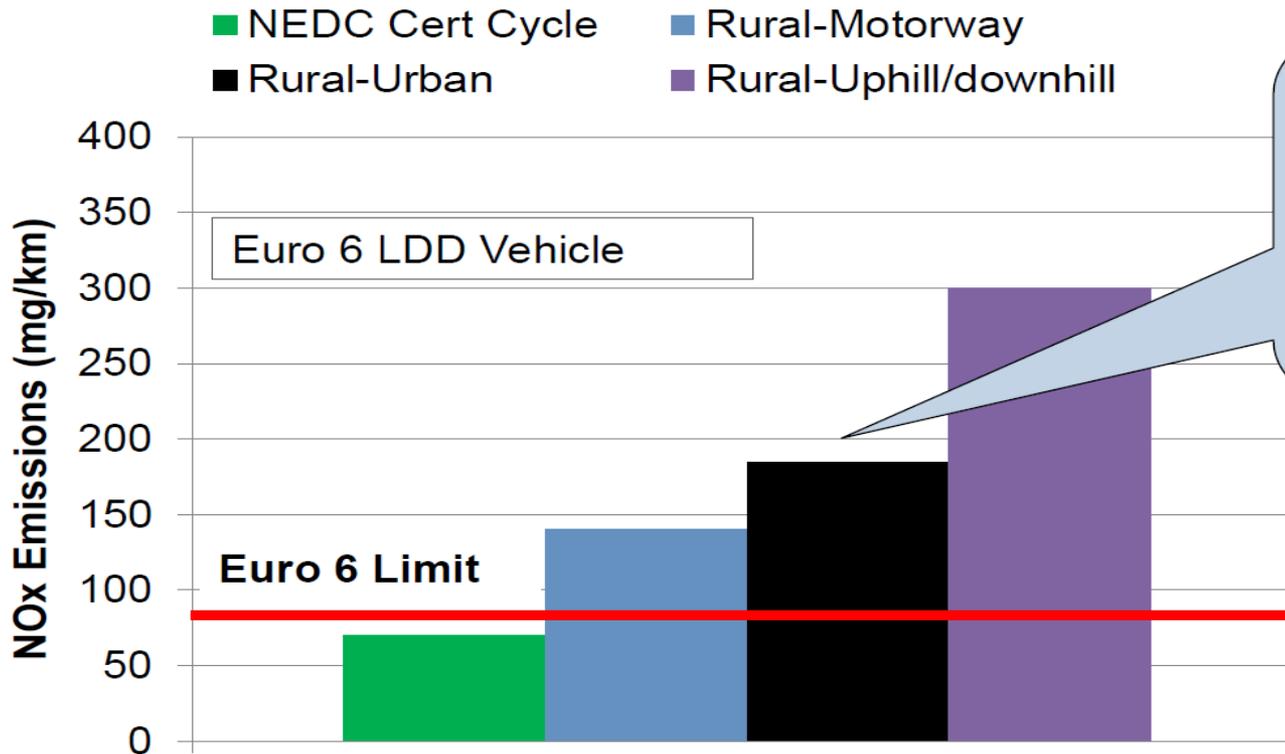
NO₂-Immission

Entwicklung der NO₂-Jahresmittelwerte im Mittel über ausgewählte* Messstationen im jeweiligen Belastungsregime, Zeitraum 2000-2015



* Ausgewählt wurden diejenigen Stationen, die über einen längeren Zeitraum hinweg gemessen haben. Beispiel: Im städtisch verkehrsnahen Bereich muss eine Station in mindestens 10 Jahren PM₁₀ gemessen haben, damit die Daten in die Berechnung einfließen.

Quelle: Umweltbundesamt 2016

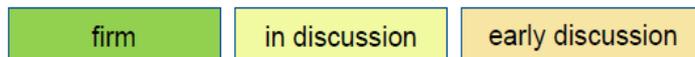


Euro 6 Limit Exceeded by Factor of 1.8 – 3.8

Source: JRC publication, 2013

Europäische Emissionsgesetzgebung

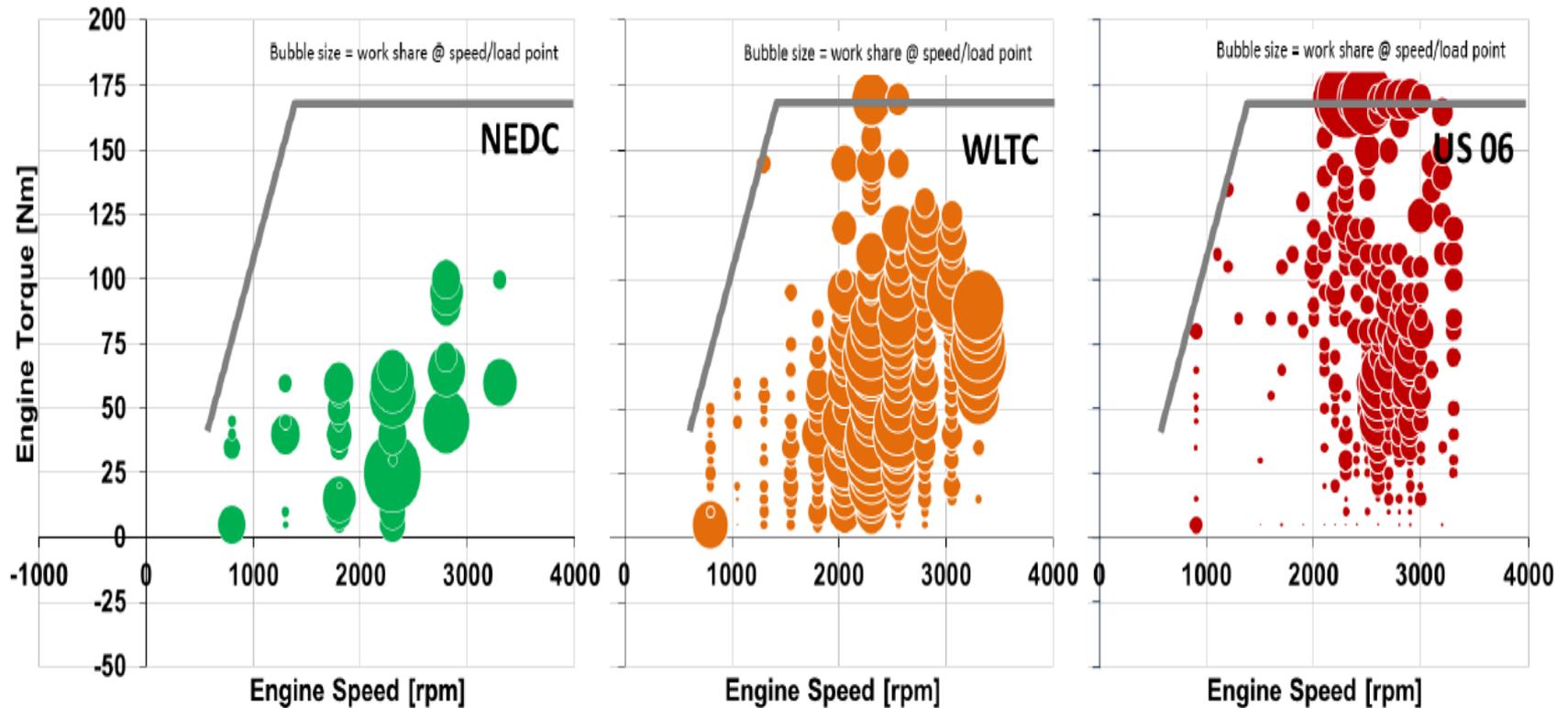
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Legislation	Euro 6a/b			Euro 6c				Euro 7*(limits for sec emissions NH ₃ , N ₂ O **, CH ₄ **, ethanol, aldehydes ?)			
					EU 6c*: -7°C test incl. NO _x , NO ₂ *, NHMC (*, **)						
Cert.Cycle	NEDC			NEDC or WLTC*				WLTC			
In-Use Compliance	RDE Monitoring (PEMS)			RDE Conf. Factors (Step 1)			RDE Conf. Factors (Step 2)				
CO ₂ Fleet Average	130 g/km (w/ WLTC(***))						95% of fleet @ 95 g/km (w/ WLTC(***))				
	M0=1372 kg		M0= tbd				Vehicle "Foot print" rather than mass				
	"Super Credits" for vehicles < 50g/km & BEVs			No „SC“			"Super Credits" for vehicles < 50g/km		No „SC“		
<p>RDE: Real World Driving Emission PEMS: Portable Emission Measurement System CI: Compression Ignition, PI-DI: Positive Ignition - Direct Injection</p> <p style="text-align: right;">*not finalized ** potentially removal of THC limit & CH₄ considered in CO₂Equivalent *** potentially w/NEDC-WLTC correlation factor</p>											



CF = 2,1 ab 2017
 CF = 1,5 ab 2021

Quelle: BASF Catalysts, 2014

Motorkennfeld in verschiedenen Testzyklen



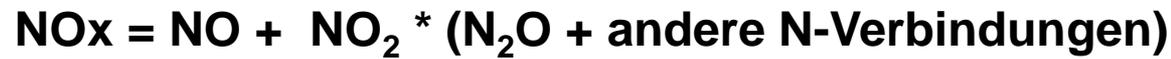
Quelle: M. Wirth, Seminar für Verbrennungsmotoren am KIT, 3.12.2015

NO_x-Emission

Verbrennung: Abgaskomponenten



andere nicht limitierte Komponenten



NO 90%

NO₂ 10%

NO entsteht hauptsächlich auf thermischem Wege

Thermisch gebildetes NO ist exponentiell von Temperatur abhängig

Gesetzgebung

Emission

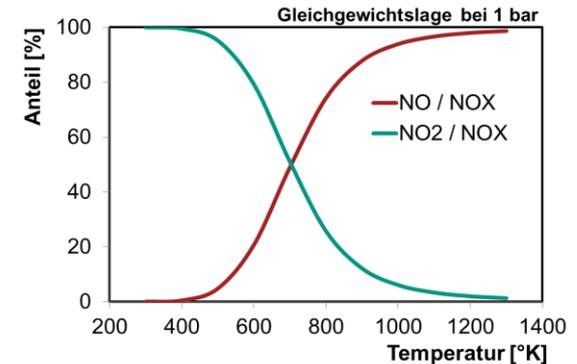
- EURO6 für PKW-Diesel: $\text{NO}_x = 80 \text{ mg/km}$; $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$
- RDE: 2017 $\text{CF} = 2,1$ $\text{NO}_x = 168 \text{ mg/km}$
 $\text{CF} = 1,5$ $\text{NO}_x = 120 \text{ mg/km}$

Immission

- $\text{NO}_2 = 40 \text{ } \mu\text{g/m}^3$

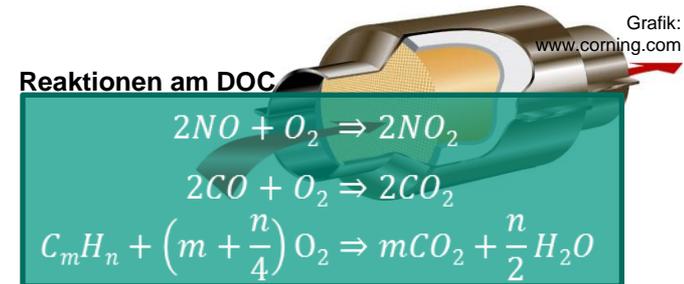
■ In der Atmosphäre:

- Emittiertes Stickstoffmonoxid NO reagiert entsprechend der Gleichgewichtsreaktion $NO + O \rightleftharpoons NO_2$



■ Oxidation im Abgastrakt:

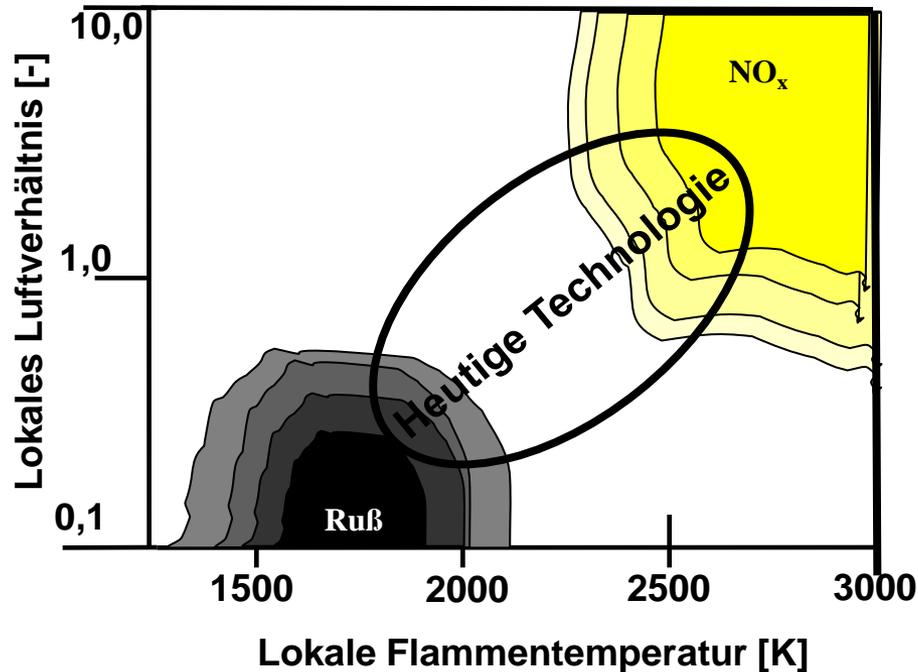
- Stickstoffmonoxid NO reagiert am Oxidationskatalysator mit vorhandenem Sauerstoff $2NO + O_2 \rightleftharpoons 2NO_2$



■ Innermotorische NO₂-Bildung:

- Bildung im Brennraum während der Verbrennungs- und Expansionsphase. Bildungsmechanismen sind bisher wenig untersucht.

Maßnahmen zur Reduktion der Abgasemissionen



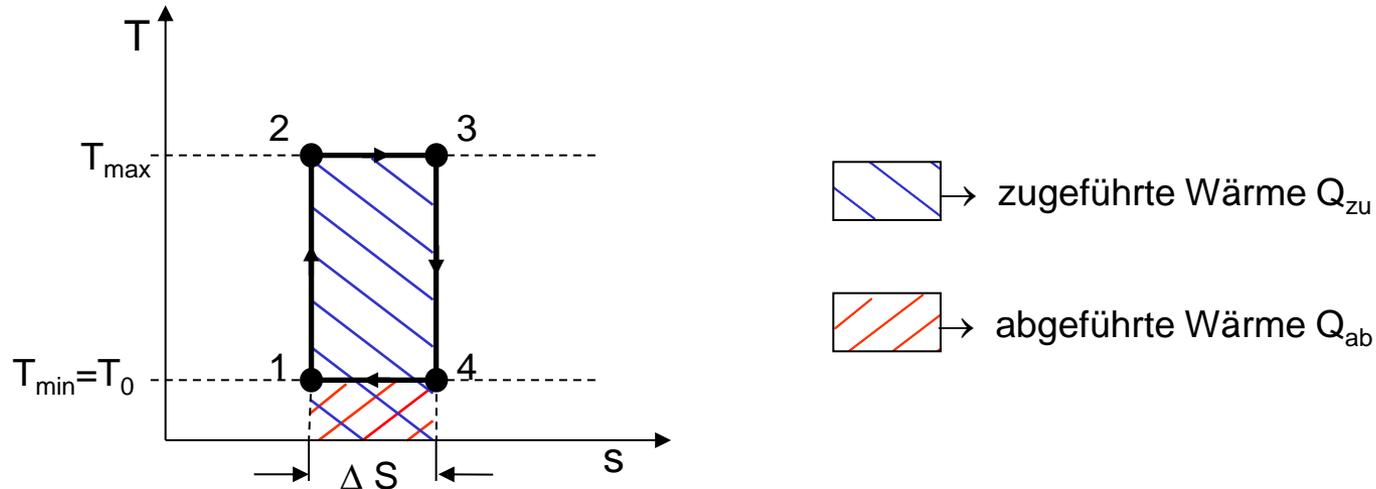
Unterdrückung der

NO-Bildung: $T < 2200 \text{ K}$

Rußbildung: $\lambda > 0,7$ und

$T \neq 1500 \text{ K bis } 1900 \text{ K}$

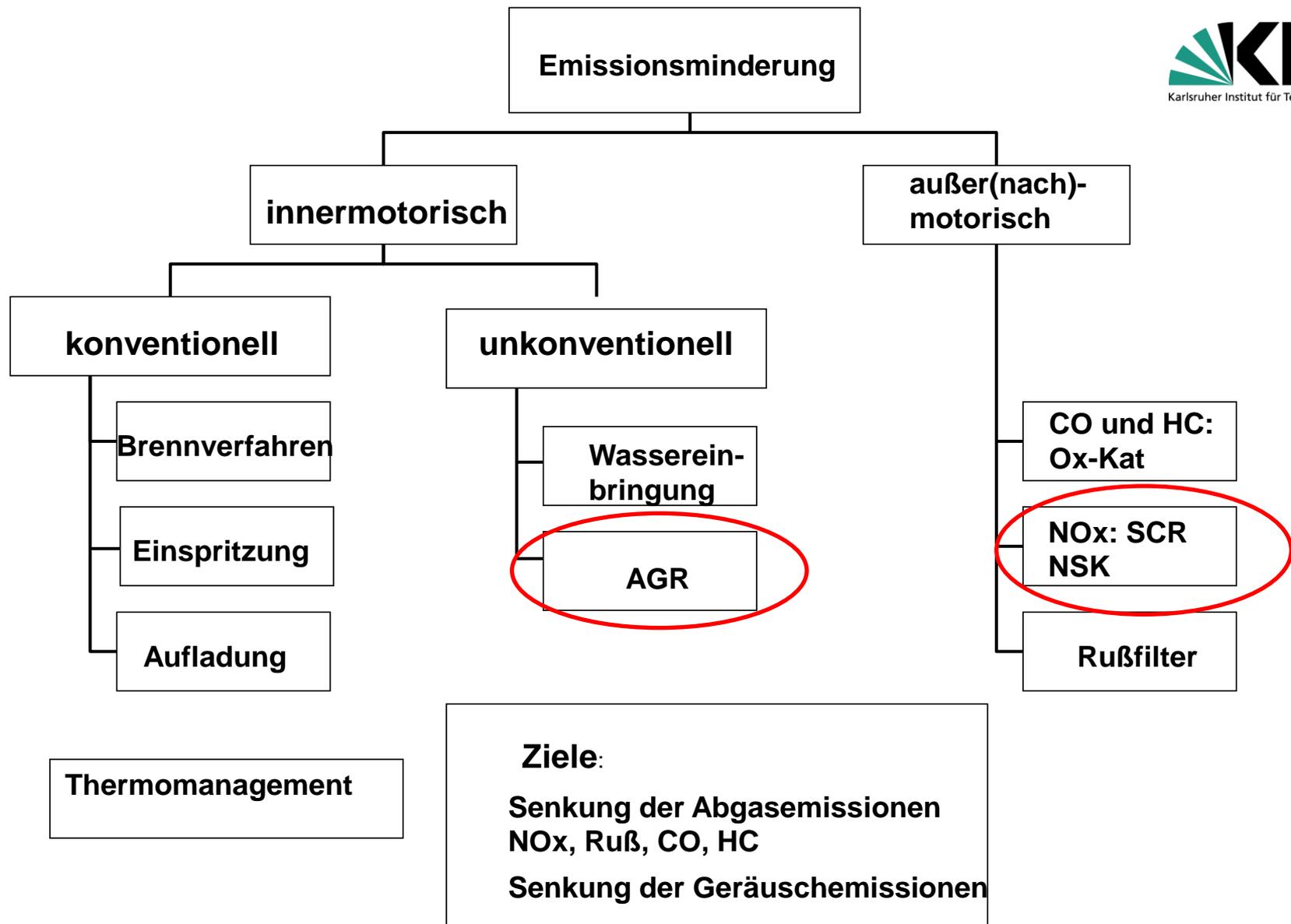
Carnot-Prozess: Idealprozess



Für den Wirkungsgrad gilt: $\rightarrow \eta_{th,C} = \frac{W}{Q_{zu}} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_{min} \cdot \Delta s}{T_{max} \cdot \Delta s} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$

Je höher die maximale Temperatur, um so höher der Wirkungsgrad und die NO-Emission

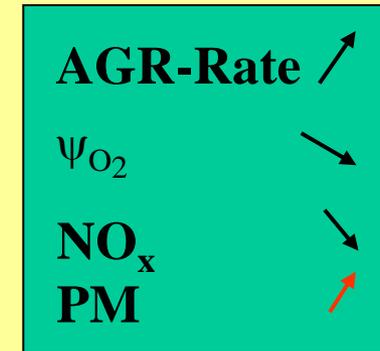
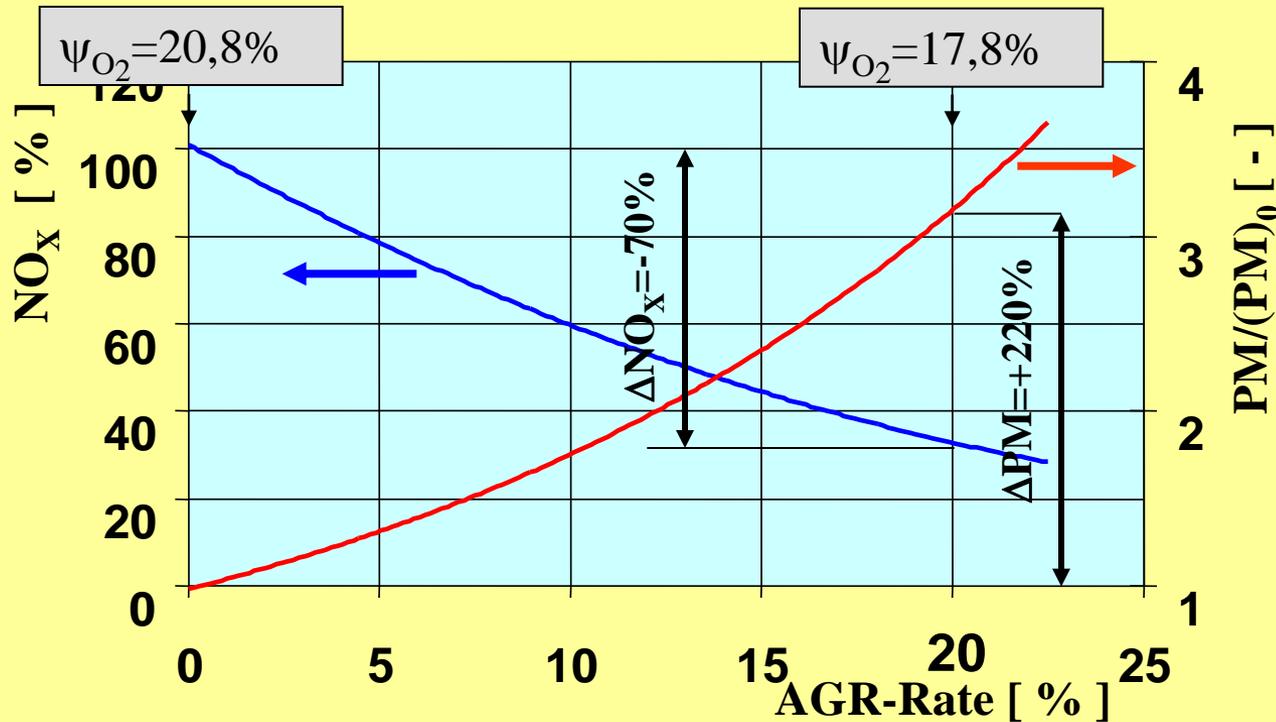
\rightarrow **NO/Wirkungsgrad-Schere**



Möglichkeiten der Schadstoffreduktion

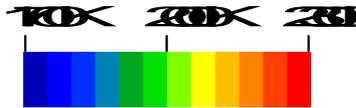
Einfluss der Abgasrückführung auf die Emissionen

BASIS: EURO II

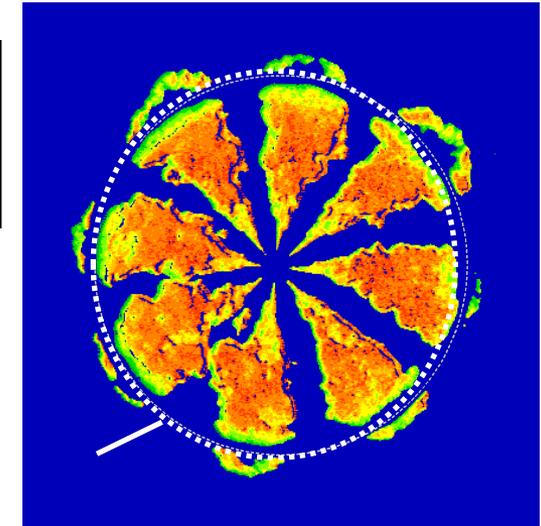


Senkung der Gastemperatur bei der Abgasrückführung

Temperaturskala

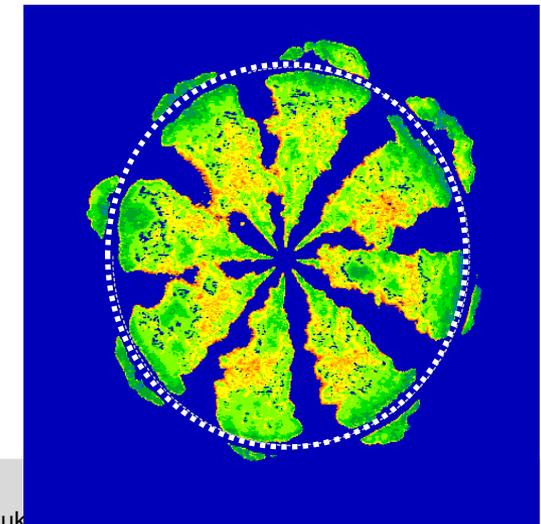


ohne
AGR



Hauptursache der NO_x -
Senkung:
Senkung der Temperatur

10 %
AGR

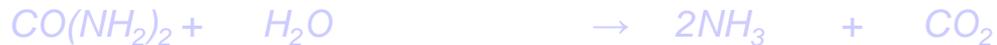


Außermotorische Maßnahme: Abgasnachbehandlung NO_x-Reduzierung: SCR-Verfahren mit Harnstofflösung

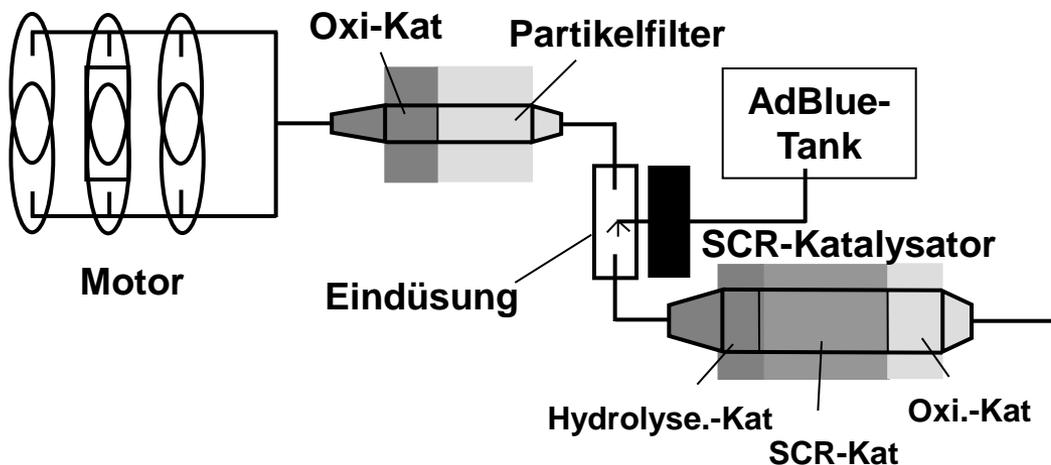
Abgasnachbehandlung beim GL 350 Bluetec von Mercedes

SCR (selektive katalytische Reduktion):

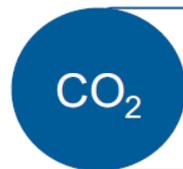
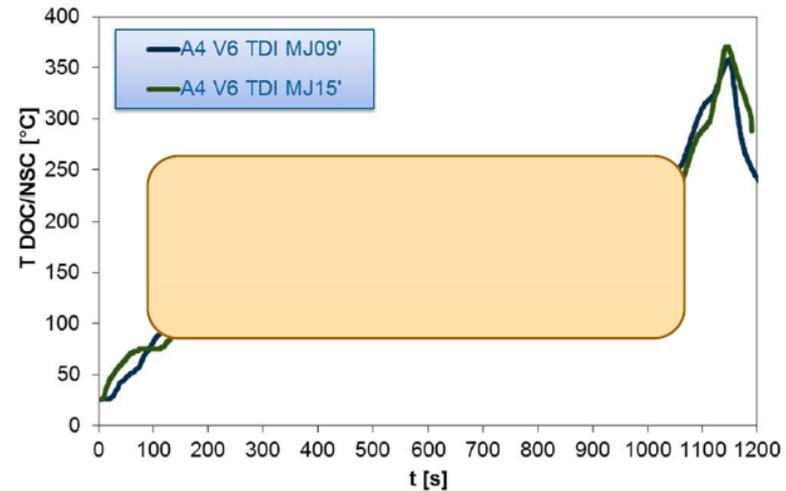
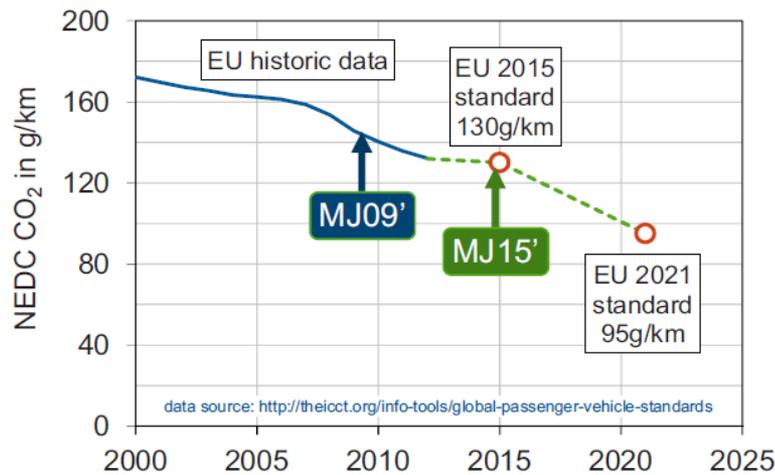
- Eindüsung einer Harnstofflösung (AdBlue)
- Harnstoff mittels Hydrolyse in Ammoniak und CO₂ umgewandelt:



- Ammoniak reduziert NO_x im SCR-Kat zu N₂ und H₂O



European Legislation Road Map CO₂

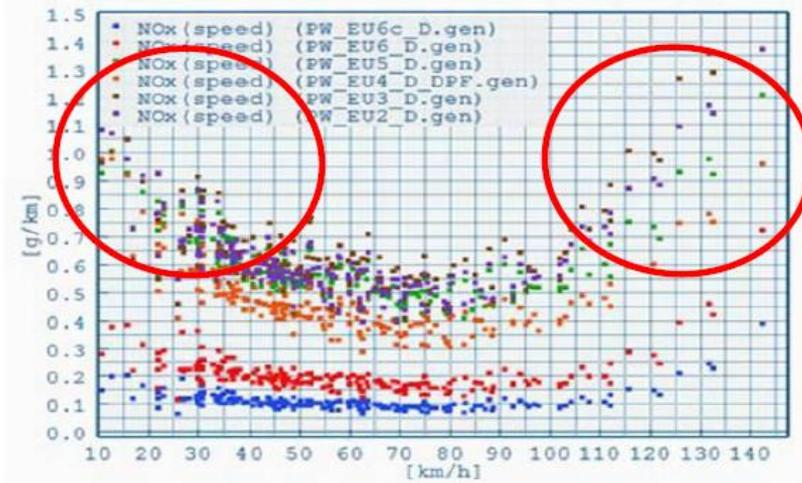


Colder Temperatures:
Challenge for after treatment systems

Thermomanagement

Quelle: Ina Gristedde; UMICORE

NOx-Emission im Realbetrieb



Quelle: INFRAS, [Online]. Available: <http://www.hbefa.net/Tools/DE/MainSite.asp>
Beispielhafte Emissionsdarstellung



Quelle: ICCT_PEMS-study_diesel-cars_2014_factsheet_DE.pdf

Schon in den 1990er Jahren gab es erste Aufzeichnungen, dass die NO_x-Realemissionen auch erhöht sind (HBEFA, INFRAS)!

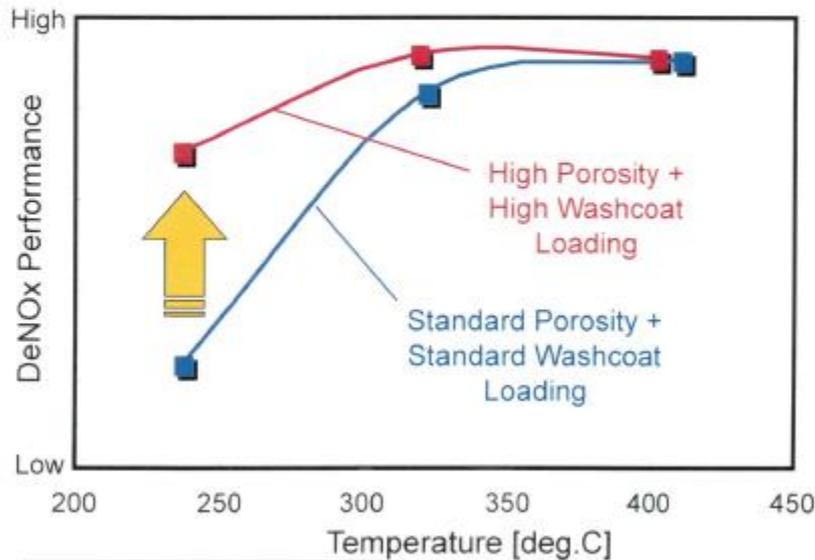
Bis EURO6b war es bei allen Herstellern das nachvollziehbare Entwicklungsziel, die Emissionen im NEFZ einzuhalten. Der Realbetrieb stand nicht im Fokus der Entwicklung.

Diese Lücke muss mit der neuesten Fahrzeuggeneration geschlossen werden.

Effect of High Porosity Substrates for SCR

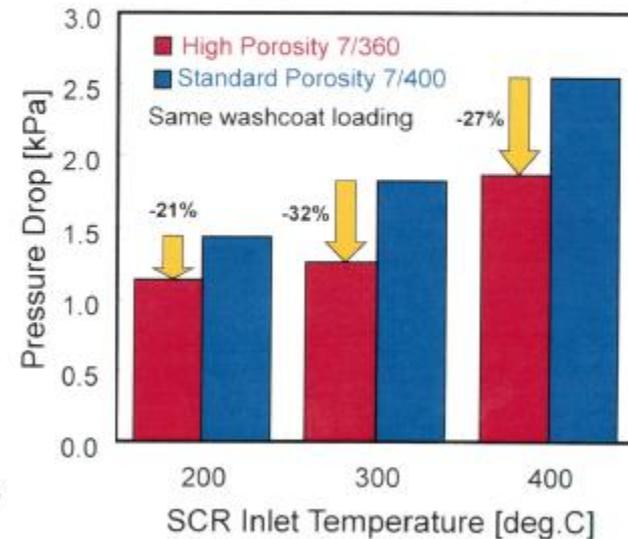


1) Significant DeNOx Performance Improvement at Low Temperature



[Test Conditions]
no DOC
Space Velocity=40,000 hr⁻¹

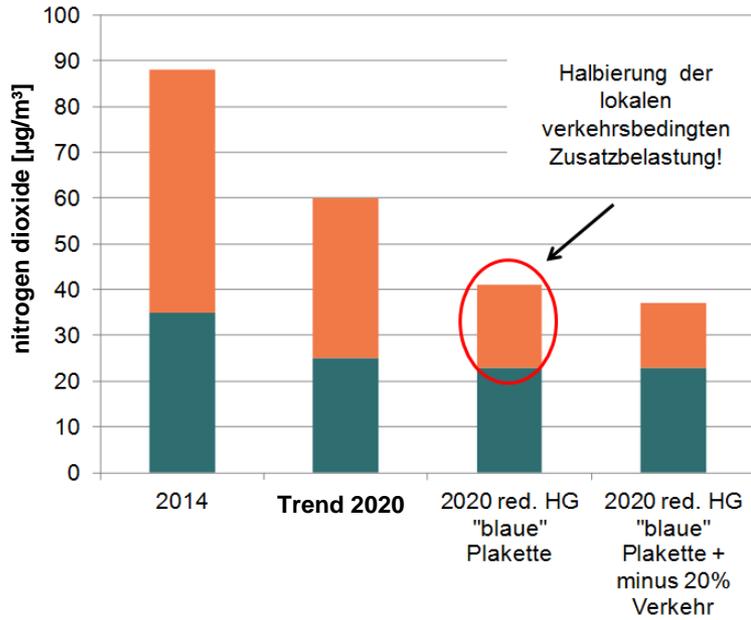
2) Pressure Drop Reduction approx.15% Saving



[Test Conditions]
Engine: 8.0 Liters
Engine Speed: 1,500 rpm

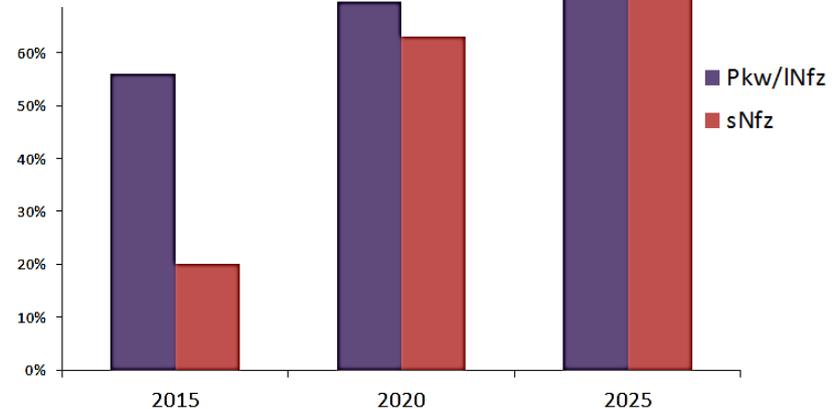
Source: C.-D. Vogt et al., NGK, 8. FAD Konferenz 2010, Dresden

NO₂-Immission mit blauer Plakete



- local traffic-related additional pollution
- Background pollution

Anteil Kfz mit "blauer Plakette"



Quelle: C. Erdmenger: Mit nachhaltiger Mobilität zur Einhaltung der Luftgrenzwerte in Baden-Württemberg, Tagung Motorische Stickoxidbildung, Heidelberg, Januar 2016

Blaue Plakette:

- Euro 6 Fahrzeuge mit Dieselmotoren und Ottomotoren mit Direkteinspritzung
- Euro 3 Fahrzeuge mit Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung
- Euro 3 Fahrzeuge mit CNG/LNG
- Elektrofahrzeuge

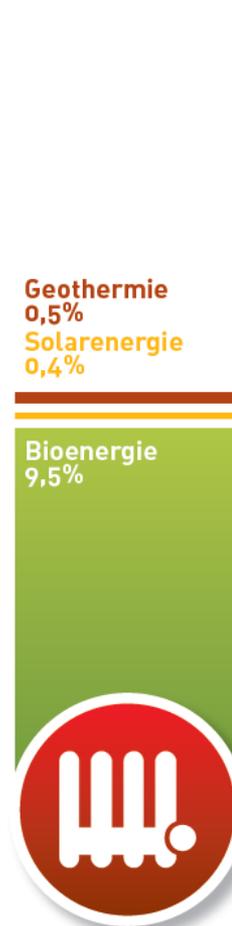
AUSBLICK

Bedeutung der Bioenergie innerhalb der Erneuerbaren Energien 2011

Strom
20,0%



Wärme
10,4%



Kraftstoff
5,6%

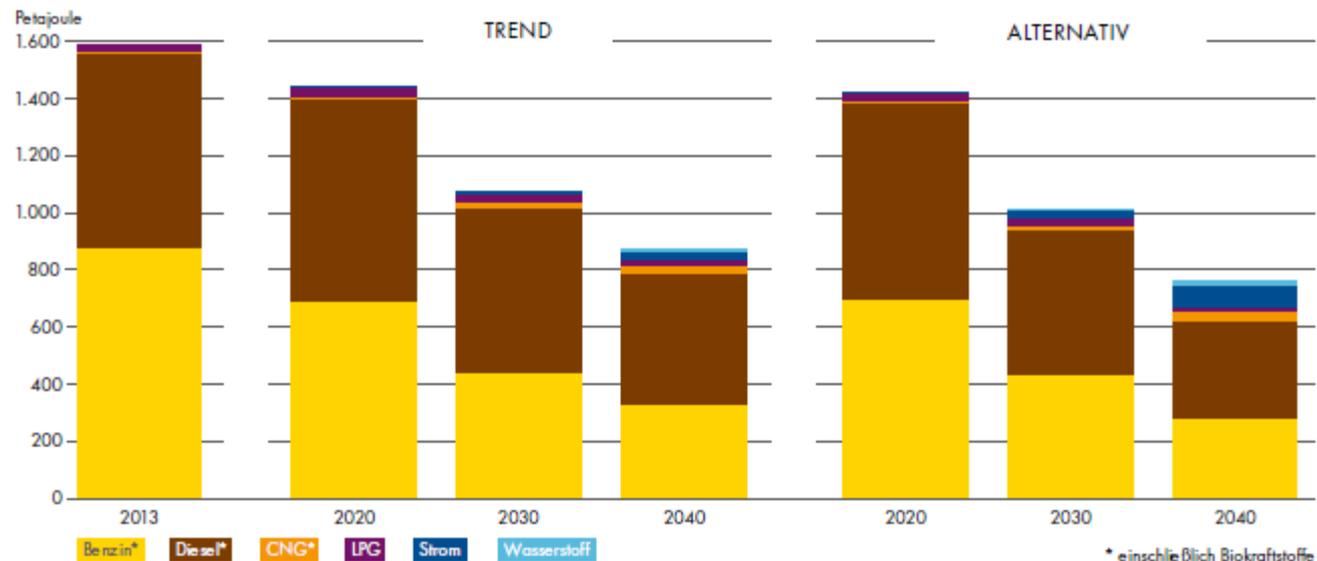


Quelle: BMU 03/2012

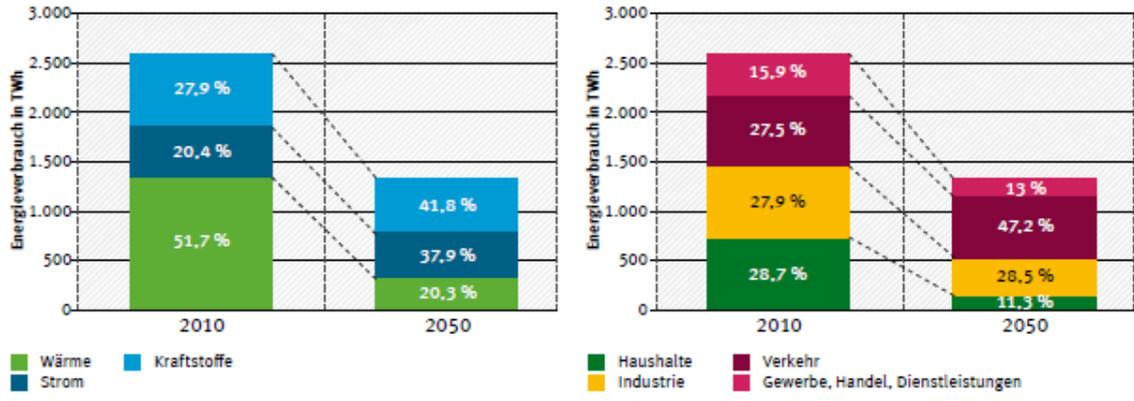
Randbedingungen 2040

**Wie viele Liter AKS werden benötigt?
800 PJ = 23 Mrd Liter bei 35 MJ/l Energiedichte**

42/ PKW-KRAFTSTOFF- UND ENERGIEVERBRAUCH NACH ENERGIETRÄGER

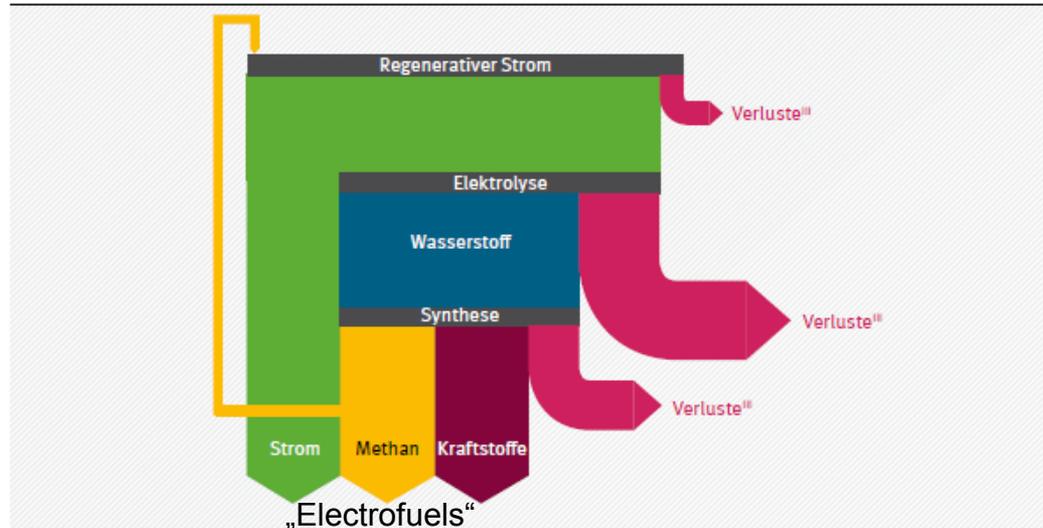


UBA THGND 2050 – Szenario, Vergleich der Endenergie im Jahr 2010 und 2050 (links: Darstellung nach Anwendungen, rechts: Darstellung nach Sektoren)^{I,II}



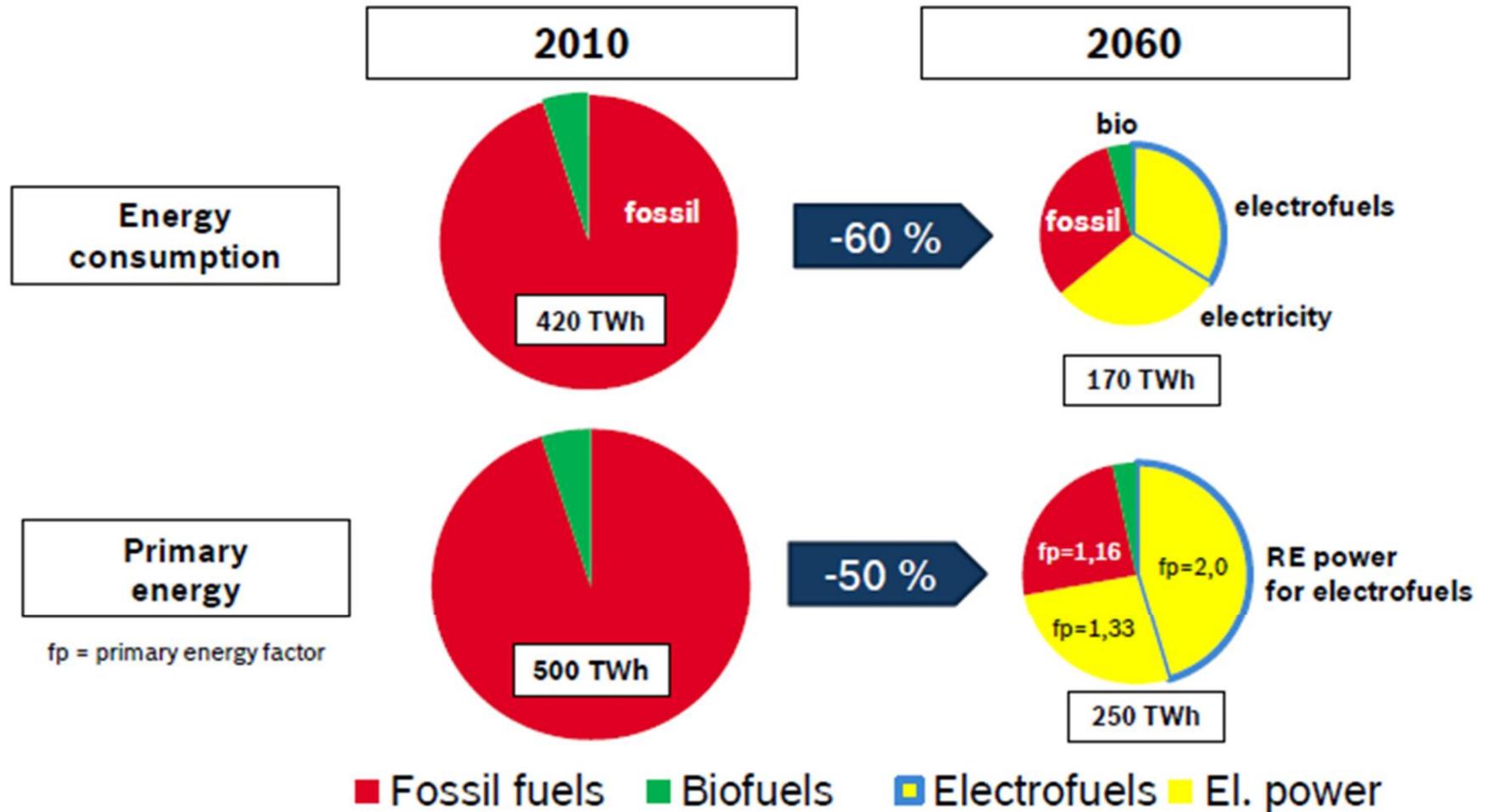
I Im Verkehr werden bei der Bilanzierung für den Seeverkehr bisher nur die inländischen Bunkeremengen einbezogen und nicht der deutsche Anteil am internationalen Seeverkehr. Ähnlich wird im Flugverkehr verfahren. Im Rahmen dieser Bilanzgrenzen wird eine erhebliche Minderung erreicht. Bezieht man jedoch den deutschen Anteil am internationalen See- und Flugverkehr mit ein, ergibt sich im Vergleich zu 2010 nur eine geringe Senkung des Endenergieverbrauchs.
 II Ohne Endenergie in Form von regenerativem Methan als Einsatzstoff in der chemischen Industrie (aufgrund der derzeitigen Bilanzierungsweise).

Qualitative Darstellung des Energieflusses im UBA THGN D 2050 Szenario^{I,II} eigene Darstellung.



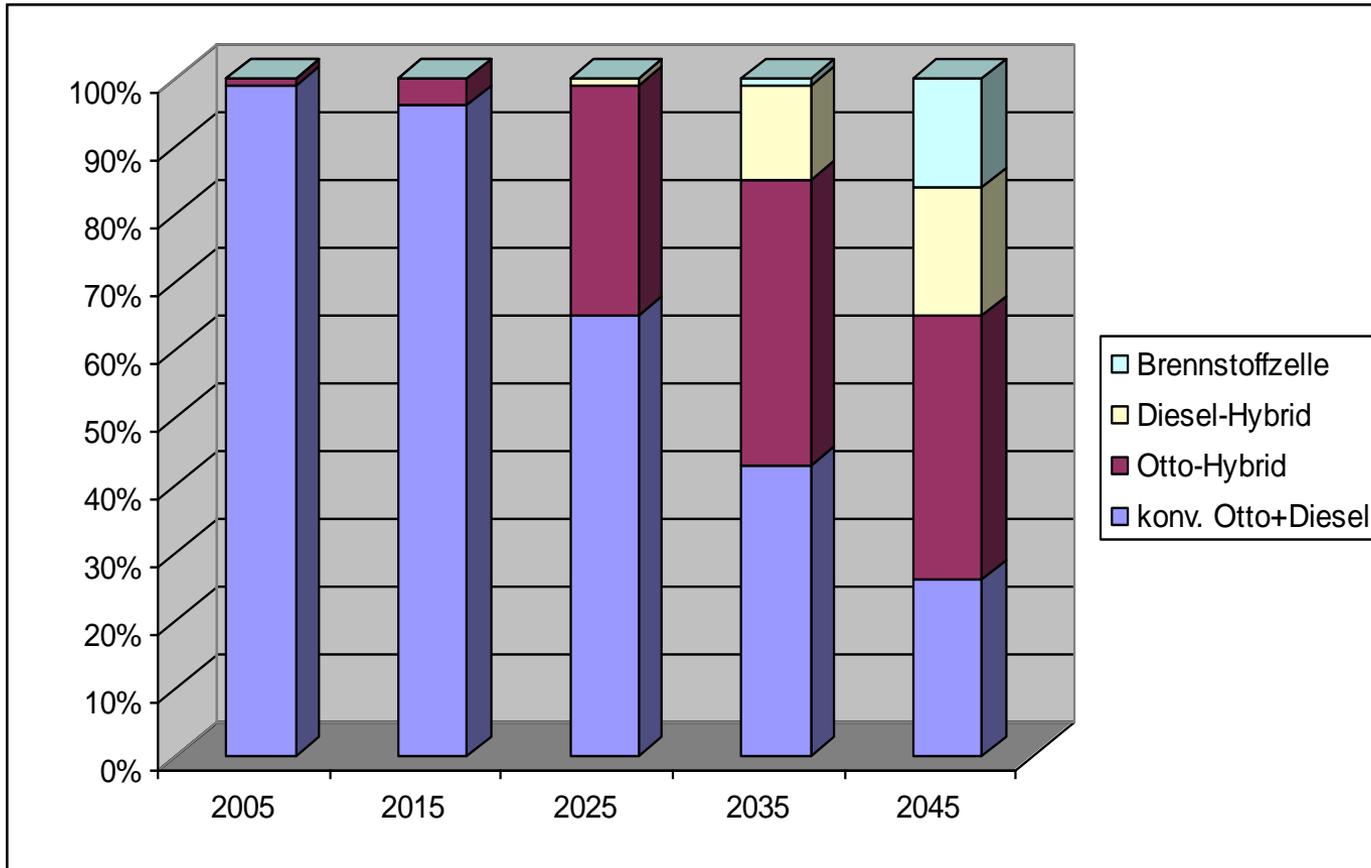
I Inklusive des Bedarfs an regenerativen Einsatzstoffen für die chemische Industrie.
 II Die Darstellungen der Energieströme sind proportional zu den notwendigen Energieströmen.
 III einschließlich Leitungsverluste, der Verluste aus der Methan-Rückverstromung und der Verluste der Biomassennutzung und Strombereitstellung

PKW Deutschland: Energieverbrauch und Primärenergiebedarf Szenario 2060 mit 1/3 BEV's und 1/3 electrofuels



Leonhard, R.; Stuttgarter Symposium 2015

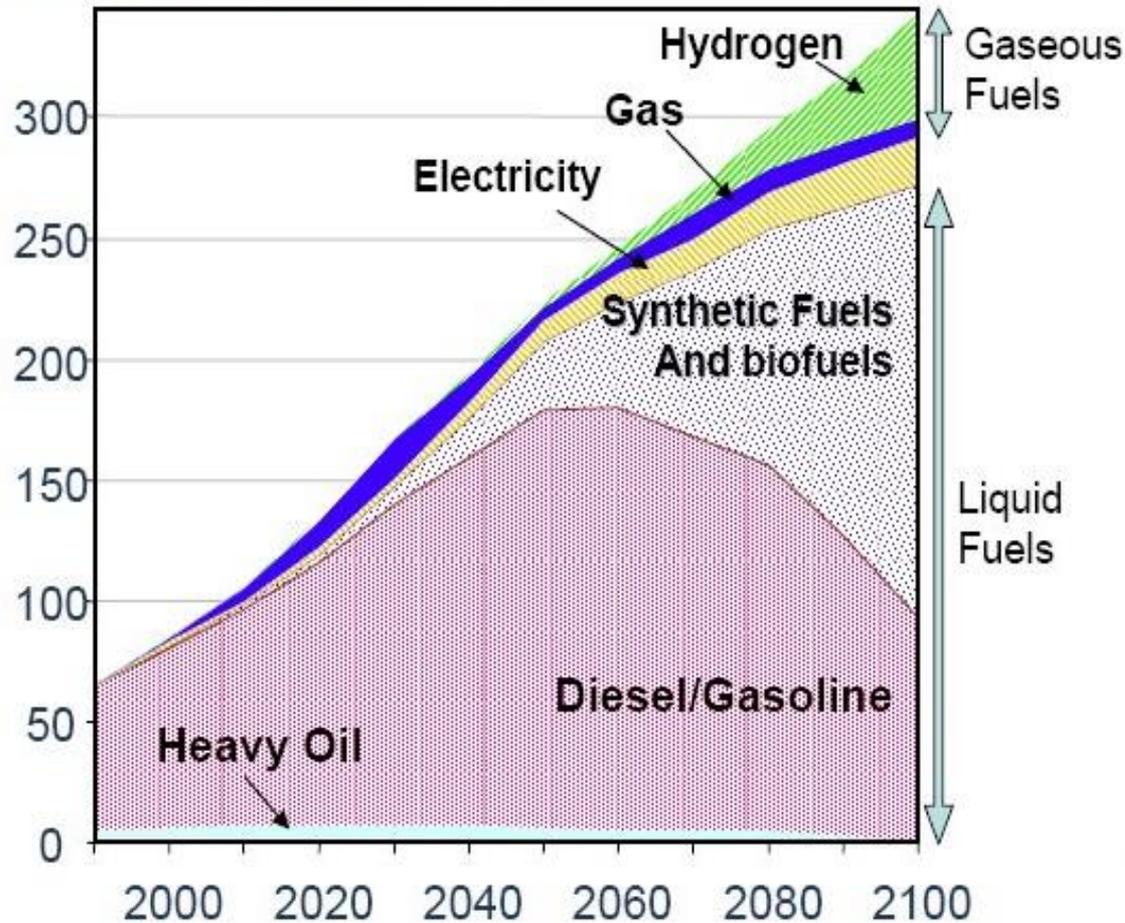
Weltweiter Marktanteil der Antriebe bei Neufahrzeugen



Quelle: Nissan

Forecast: Fuels for Powertrains

Energy Demand ($\times 10^{18}$ J)



- Since there are no natural H_2 sources, H_2 is not an energy source, but rather an energy carrier
- **World Energy Council: H_2 will play no significant role in the next 50 years**
- Proportion of fossil fuels will decrease from 2050 on
- Liquid fuels will still dominate in 2100 (combustion engines)

source: WEC

Volumen, Energiedichte und Kosten im Vergleich

Kosten

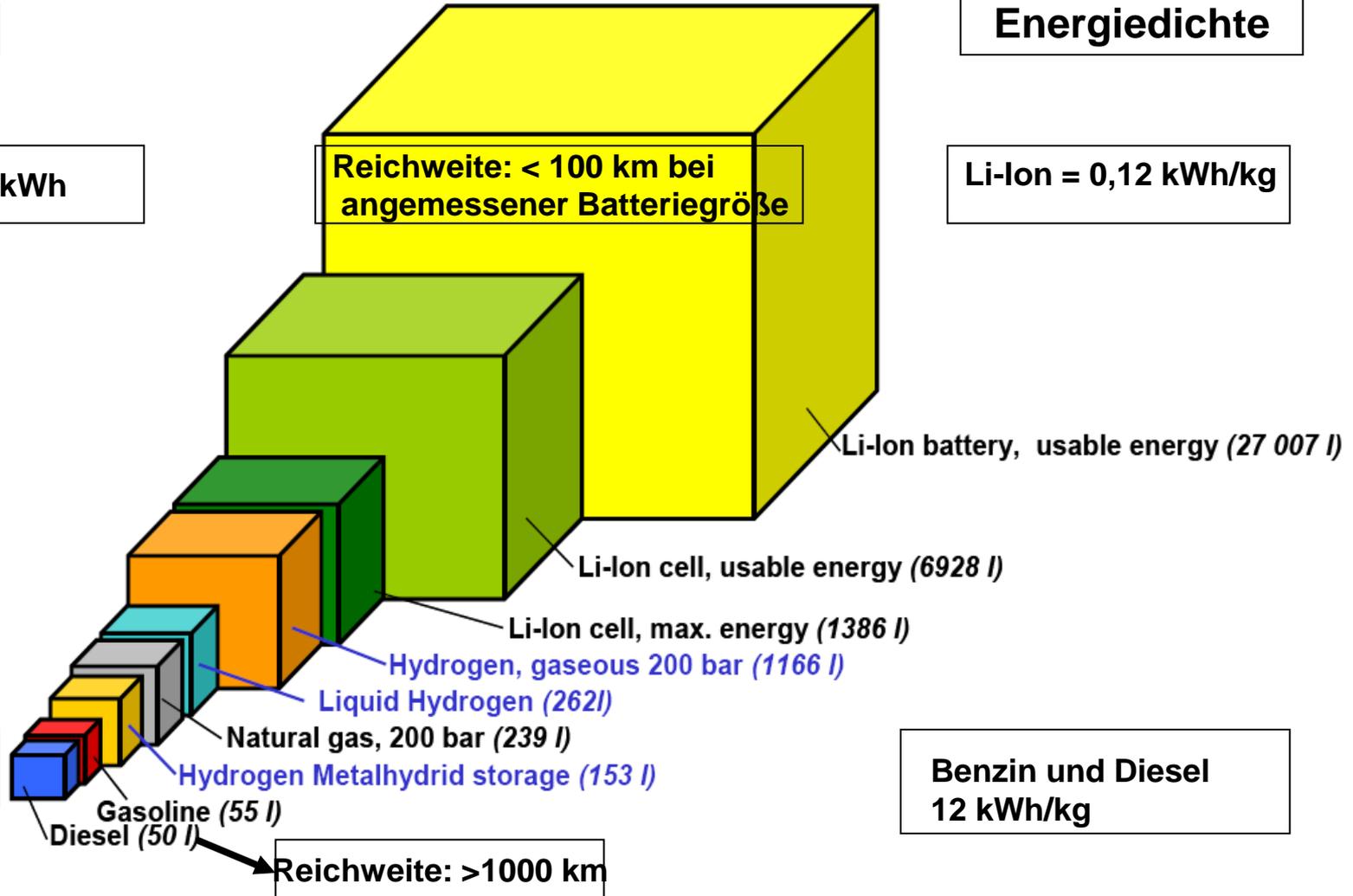
250 – 500 €/kWh

Energiedichte

Li-Ion = 0,12 kWh/kg

10-20 €/kWh

0,5 – 1,0 €/kWh



Wenn es gelingt, im Verkehrssektor ausschließlich CO₂-neutrale Kraftstoffe einzusetzen, kann dies dazu genutzt werden, durch Verschlechterung des Wirkungsgrads ohne CO₂-Malus die Abgastemperatur zu erhöhen. Damit kann der optimale Temperaturbereich in der Abgasnachbehandlungsanlage schneller erreicht werden.

So bewegen wir uns in Richtung emissionsfreie Mobilität !!!

Bemerkenswert: die Natur interessiert sich mehr für die Energiedichte und weniger für die Effizienz (vgl. Photosynthese, Photovoltaik)

ZUSAMMENFASSUNG

- Der Dieselmotor ist die Wärmekraftmaschine mit dem höchsten Wirkungsgrad ($\eta_{th} = 42\%$ bis 52%)
- Optimierte Abgasnachbehandlung und Verbrennung werden zur Verringerung der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs führen
- Partikelemission für EURO6-Fahrzeuge mit Partikelfilter nicht mehr im Fokus
- Mit Einführung des WLTP und RDE wird der Unterschied zwischen Testwert und Realemissionen sinken
- Eine Verschärfung der Emissionsgrenzwerte wirkt sich auch auf die Realemissionen aus
- Je niedriger die Emission, umso niedriger die Immission
- Einführung der blauen Plakette und Reduktion des Verkehrs in Städten versprechen eine verbesserte Luftqualität

THESEN

Individuelle Mobilität:

- **Verbrennungsmotor wird noch sehr lange Hauptantrieb bleiben**
- **Durch Weiterentwicklung wird der Verbrennungsmotor zu Senkung der Schadstoff- und CO₂-Emission beitragen**
- **Elektroantrieb wird vorerst keinen nennenswerten Beitrag zur Senkung der CO₂-Emission leisten**
- **Der Anteil flüssiger Biokraftstoffe wird sich kontinuierlich erhöhen**

Stromerzeugung

- **100% Strom aus so genannten erneuerbaren Energien ist denkbar**

Qou Vadis Dieselmotor?

**Der Dieselmotor wird seine
dominierende Stellung im Verkehr
behaupten !**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit