

# FORSCHUNG.bewegt



DRESDEN

## FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR VERKEHRS- UND INFRASTRUKTURSYSTEME IVI

### Fahrverbote für saubere Luft?

Prof. Dr. Matthias Klingner

Elke Sähn

[www.ivi.fraunhofer.de](http://www.ivi.fraunhofer.de)



## Fraunhofer IVI Zahlen und Fakten

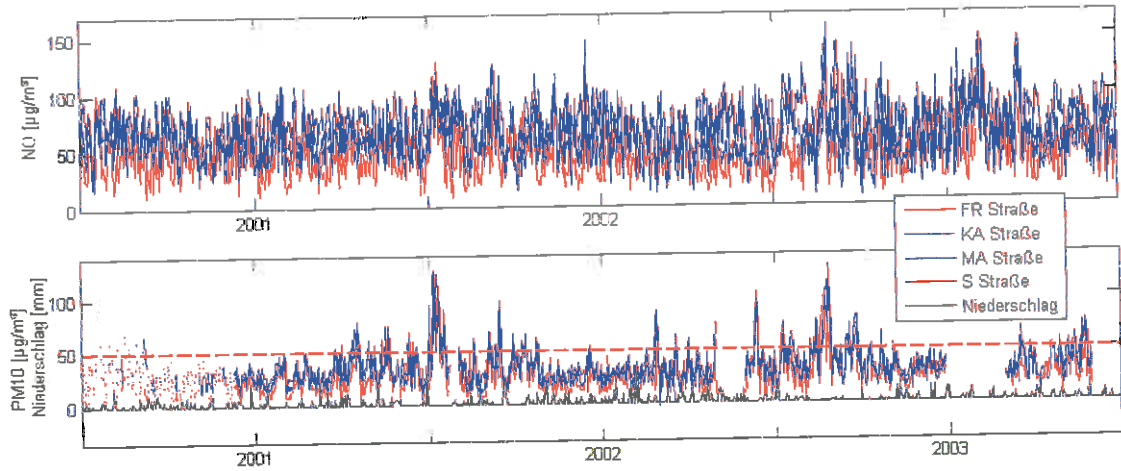
Institutsleiter

**Prof. Dr.-Ing. Matthias Klingner**

- 130 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter
- 60 studentische Hilfskräfte
- Budget ~ 13,5 Mio. Euro (2018)
- Forschungsschwerpunkte
  - Alternative Antriebstechnik
  - Intelligente Verkehrssysteme
  - Fahrzeug- und Verkehrssicherheit
  - Digitale Geschäftsprozesse
  - Zivile Sicherheit



# Fraunhofer IVI Umweltdatenscreening



→ NO variiert deutlich mehr in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung  
 → PM10 variiert in Abhängigkeit von der Wetterlage

# Umweltdatenscreening Prinzipielle Komponentenanalyse

Signalanalyse von Immissions-, Wetter- und Verkehrszeitreihen

Originaldaten M



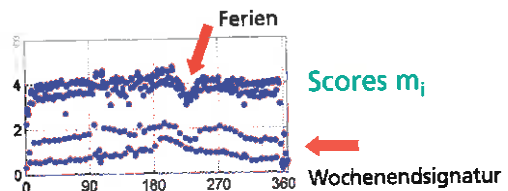
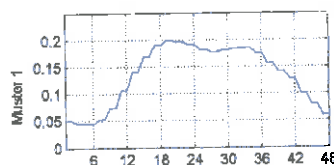
- Einflussfaktoren extrahieren und wichten
- Wirkzusammenhänge nachweisen
- Reduktionspotentiale bestimmen

orthogonale Zerlegung

$$M = U \cdot \Sigma \cdot V$$

Basismuster  $U_i$

Lkw-Verkehr  
an der BAB



# Umweltdatenscreening

## Prinzipielle Komponentanalyse

Signalanalyse von Immissions-, Wetter- und Verkehrszeitreihen

- Einflussfaktoren extrahieren und wichten
- Wirkzusammenhänge nachweisen
- Reduktionspotentiale bestimmen

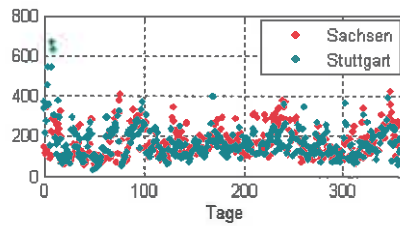
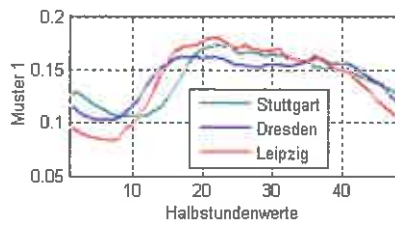
Originaldaten M



orthogonale Zerlegung

$$M = U \cdot \Sigma \cdot V$$

Basismuster  $U_i$



Scores  $m_i$

# Umweltdatenscreening

## Meteorologische Einflussfaktoren

Niederschlag (ohne Verkehrseinfluss)

TMW PM10<sub>werktags</sub>

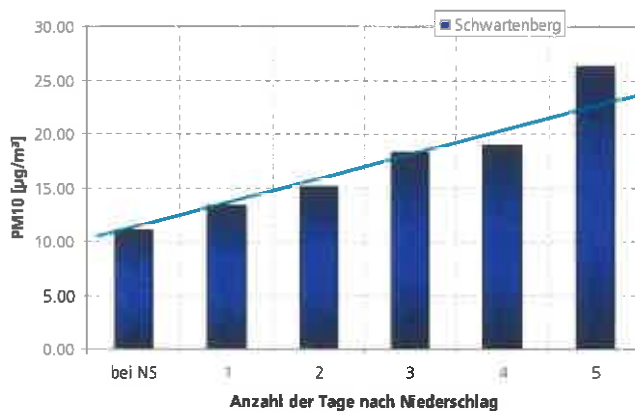
Schwartenberg über 2 Jahre:

14,66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

TMW PM10<sub>Wochenende</sub>

Schwartenberg über 2 Jahre:

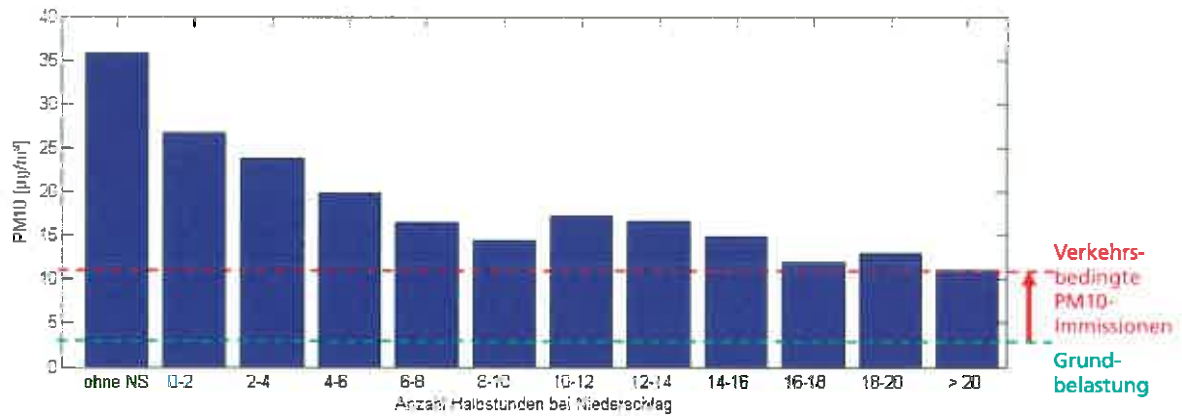
14,33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Trend PM10 bei  
fehlendem Niederschlag

## Umweltdatenscreening Meteorologische Einflussfaktoren

Einfluss der **Niederschlagsdauer**,  
Dresden Nord über zwei Jahre

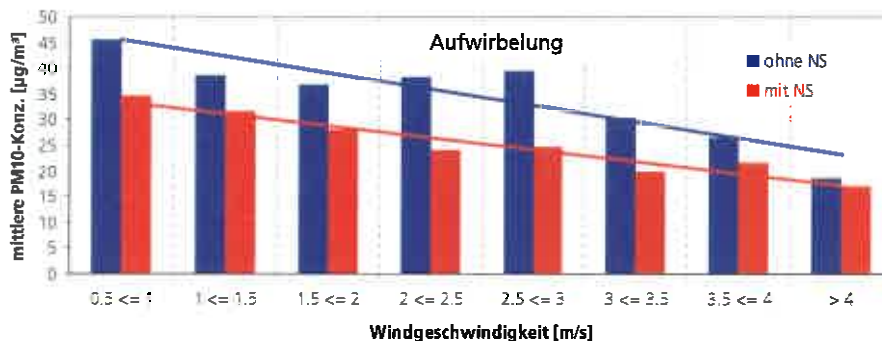


→ durch **lang anhaltenden Niederschlag** sinkt die PM10-Konzentration um **bis zu 20 µg/m³**

## Umweltdatenscreening Meteorologische Einflussfaktoren

**Wind** (mit / ohne Niederschlag)

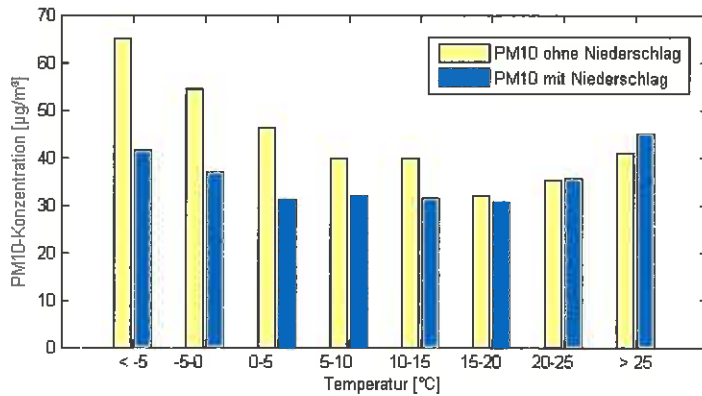
Dresden Nord über zwei Jahre



# Umweltdatenscreening

## Meteorologische Einflussfaktoren

### Lufttemperatur

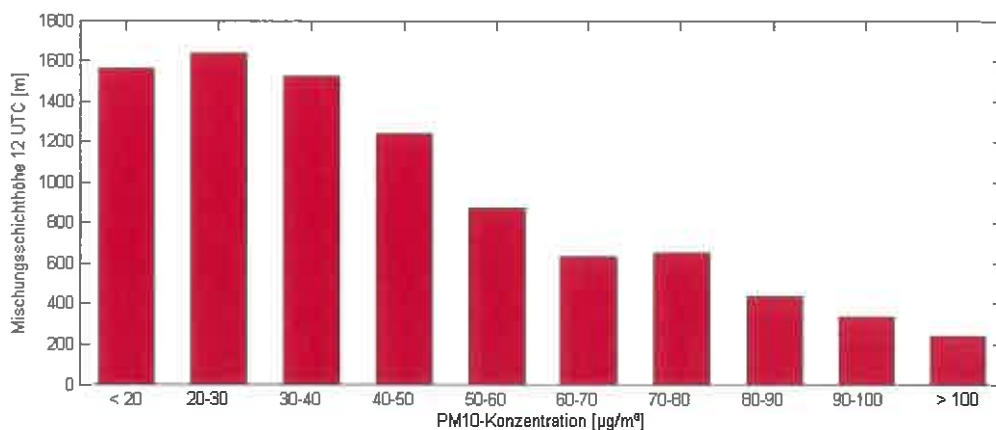


→ PM10-Konzentration steigt vor allem bei **sehr niedrigen Temperaturen** (Stuttgart Straße über 3 Jahre)

# Umweltdatenscreening

## Meteorologische Einflussfaktoren

### Mischungsschichthöhe Stuttgart Straße über 3 Jahre



# Umweltdatenscreening

## Entstehung von PM10-Episoden



### Inversion

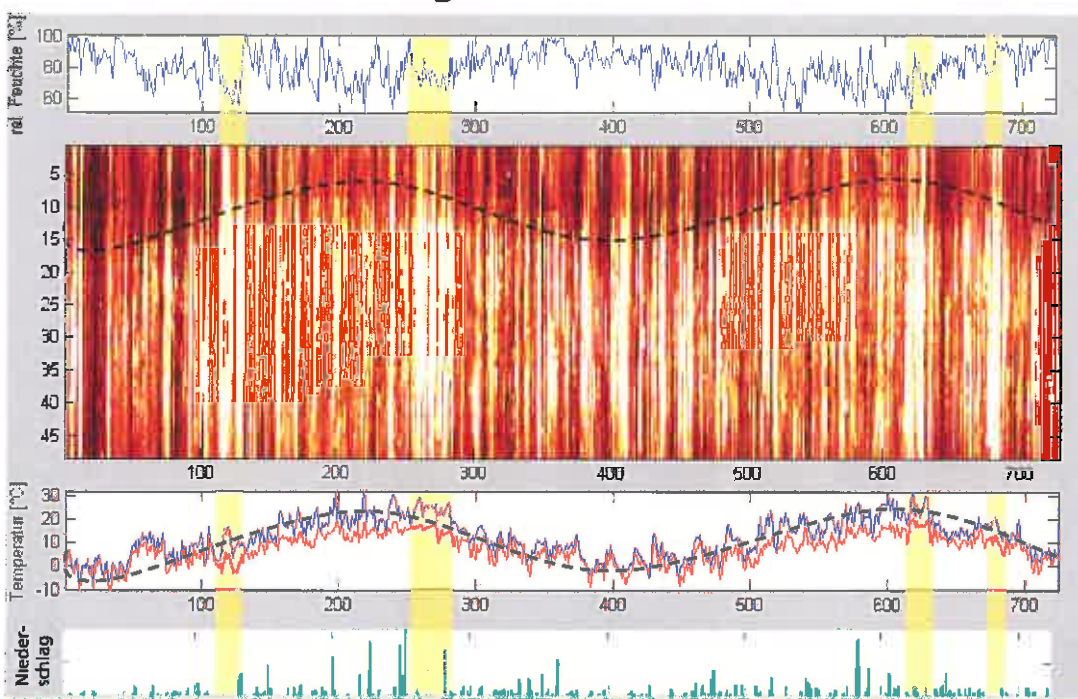
- niedrige Mischungsschichthöhe
  - fehlender vertikaler & horizontaler Luftaustausch
- »eingefrorene« Atmosphäre  
→ hohe PM10-Konzentrationen auch nachts



### Konvektion

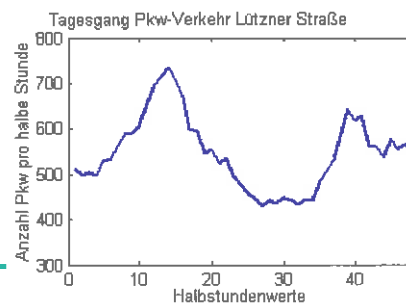
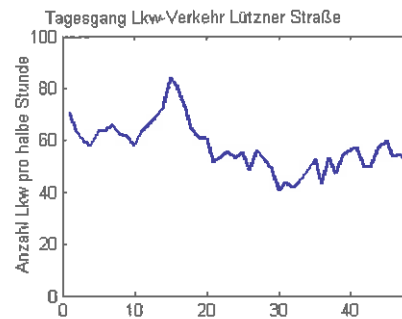
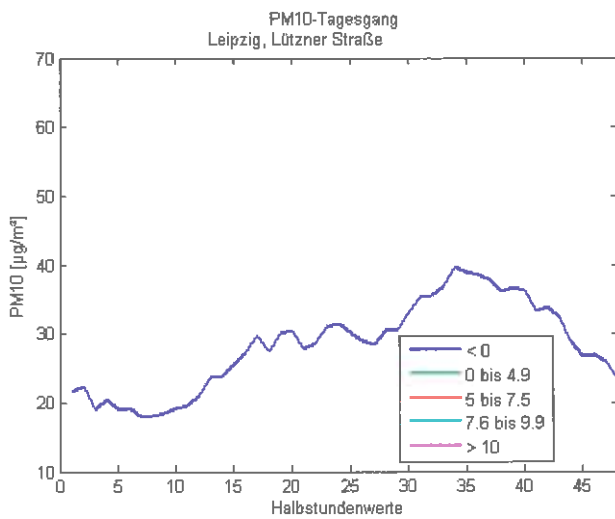
- intensive Sonneneinstrahlung
  - Trockenheit
- natürliche Staubaufwirbelung  
→ unterschiedlich starke Ausprägung des PM10-Tagesganges

# Umweltdatenscreening



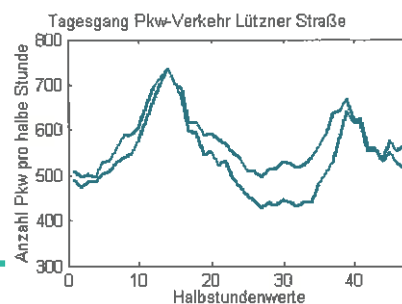
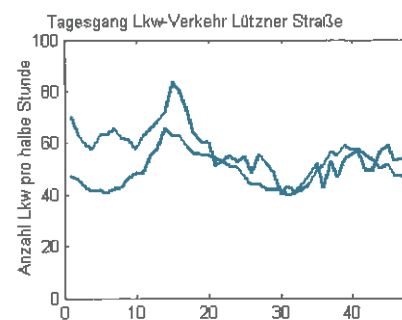
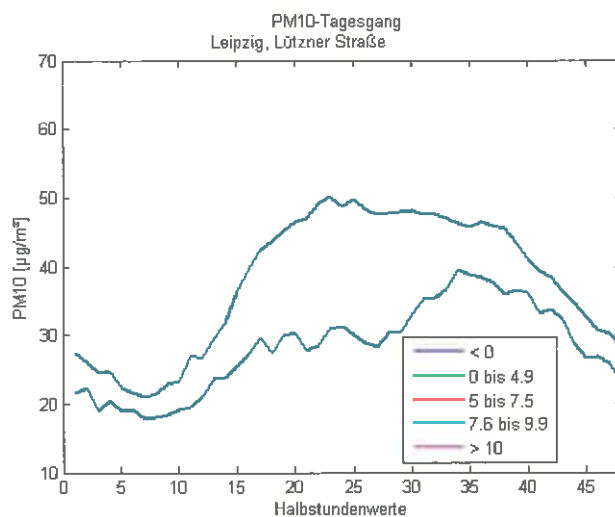
## Umweltdatenscreening

PM10-Tagesgang in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz [°C] zwischen 5 und 13 Uhr – **Straßenstation**



## Umweltdatenscreening

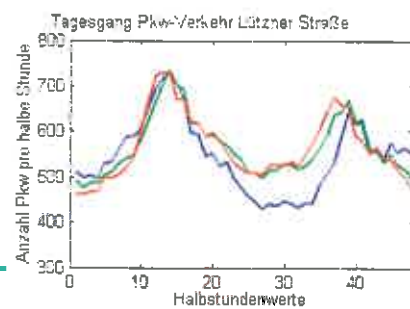
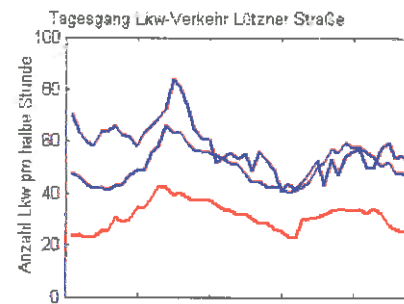
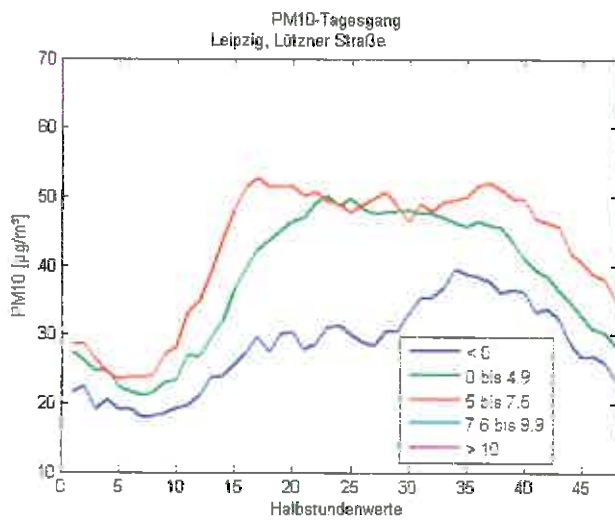
PM10-Tagesgang in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz [°C] zwischen 5 und 13 Uhr – **Straßenstation**





## Umweltdatenscreening

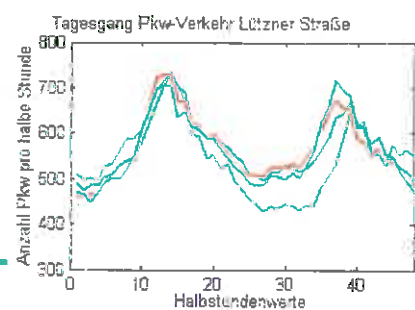
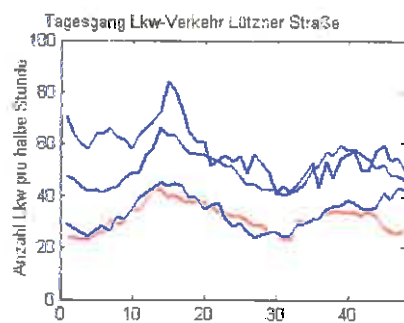
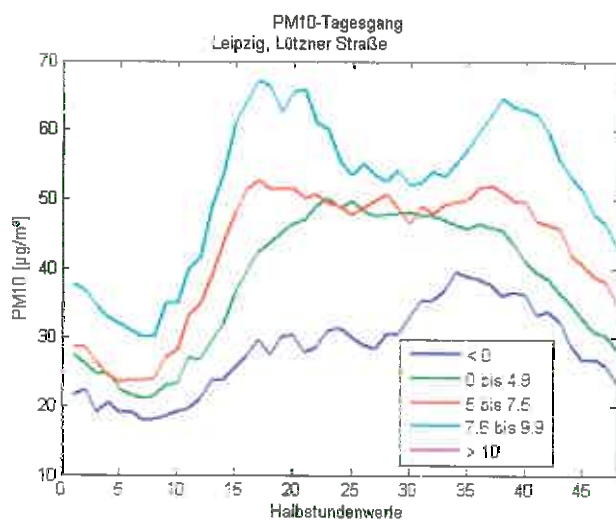
PM10-Tagesgang in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz [°C] zwischen 5 und 13 Uhr – **Straßenstation**



Fraunhofer

## Umweltdatenscreening

PM10-Tagesgang in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz [°C] zwischen 5 und 13 Uhr – **Straßenstation**

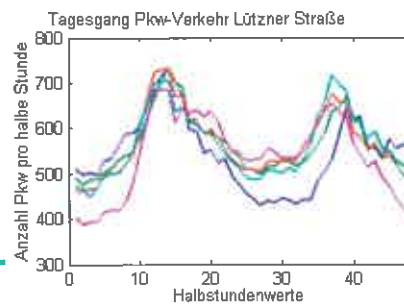
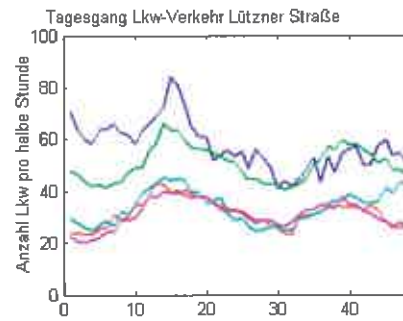
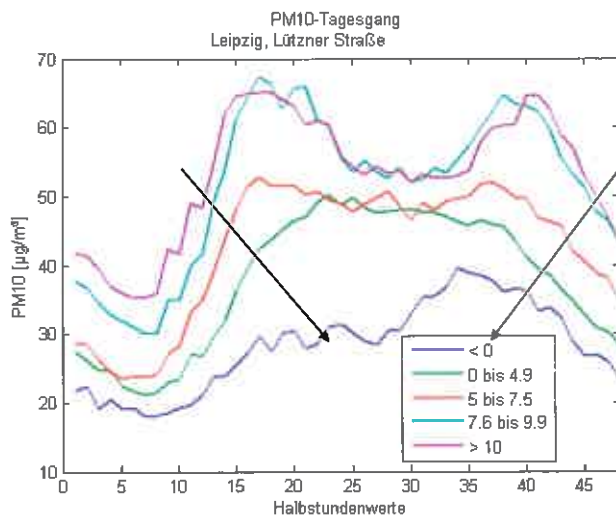


Fraunhofer

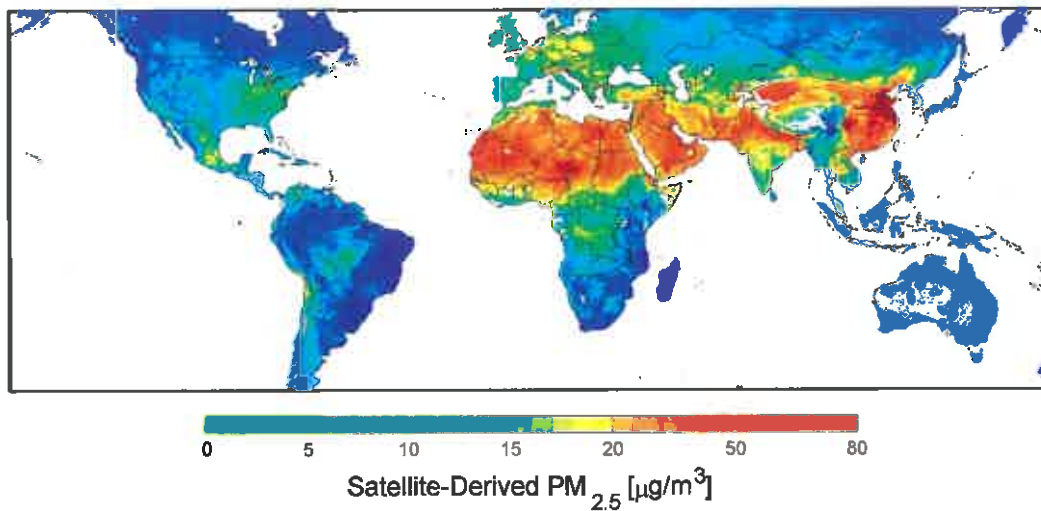


## Umweltdatenscreening

PM10-Tagesgang in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz [°C] zwischen 5 und 13 Uhr – **Straßenstation**



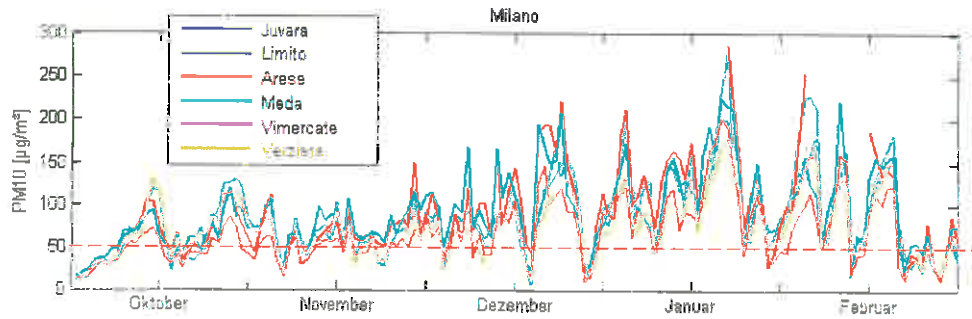
## PM2.5-Verteilung weltweit Satellitenbild



# Fraunhofer IVI

## Umweltdatenscreening

### Mailand

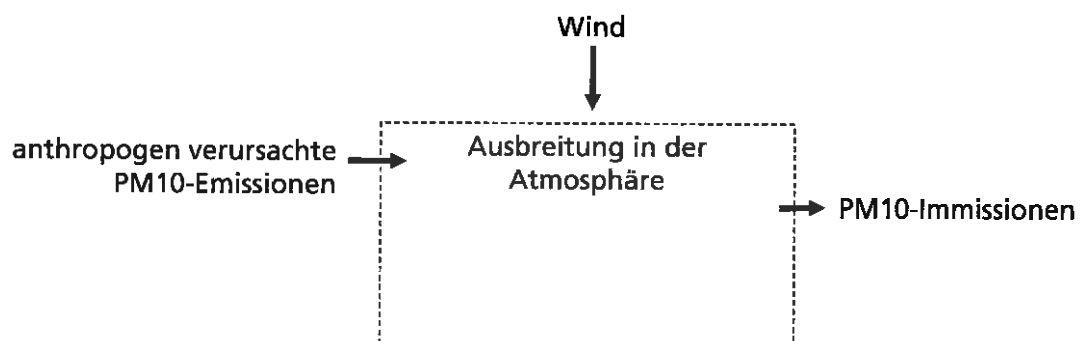


- PM10 im Bereich zwischen 12 und mehr als 250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Jahresmittelwert über 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Milano-Limito mit 113 Grenzwertüberschreitungen im Winterhalbjahr

Fraunhofer

 **Fraunhofer**  
IVI

## Emissions- und Immissionsmodelle

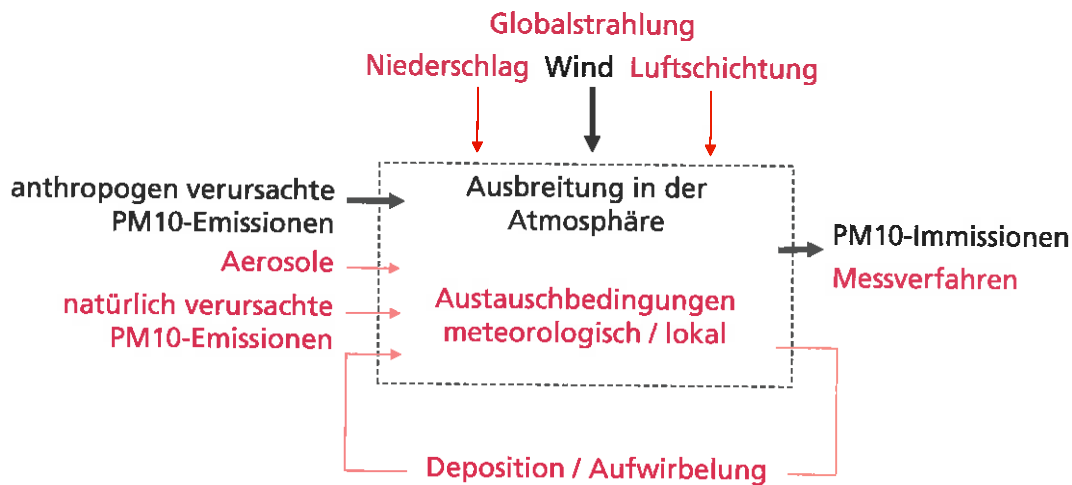


Fraunhofer

 **Fraunhofer**  
IVI

---

## Emissions- und Immissionsmodelle



---

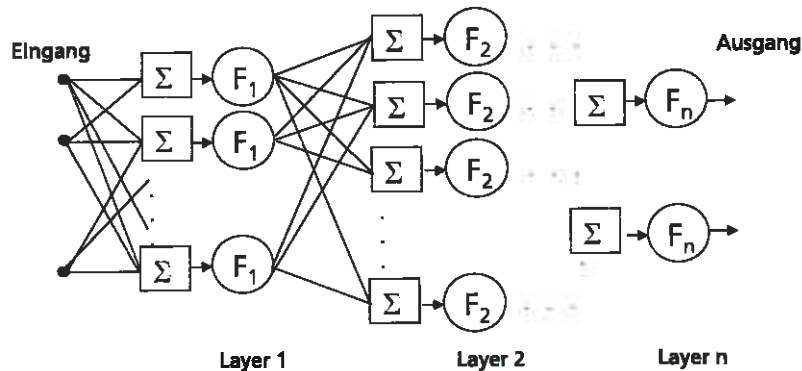
## PM10-Prognosemodell

- Voraussetzungen
  - PM10-Messdatenreihen über mindestens zwei Jahre
  - kontinuierlich erfasste meteorologische Parameter
  - Anbindung an eine Wetterprognose
- Eingangsgrößen
  - aktuelle Wettersituation - Nachwirkung meteorologischer Faktoren
  - PM10-Speicherverhalten (Luft- / Bodendeposition)
  - Unterscheidung Werkstage / Samstag / Sonn- oder Feiertage

# PM10-Prognosemodell

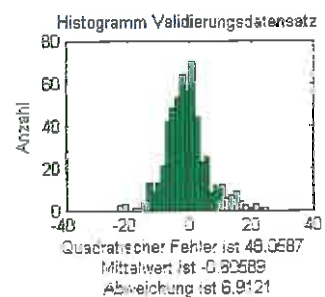
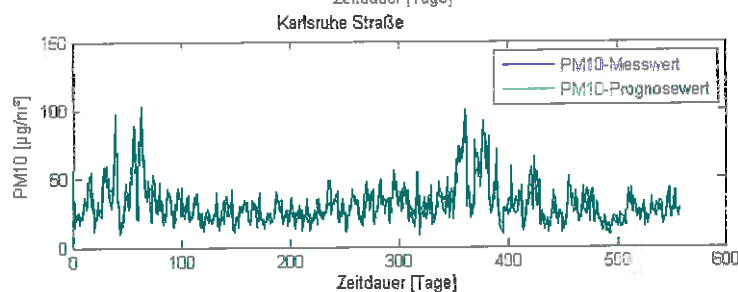
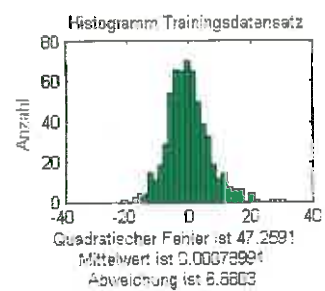
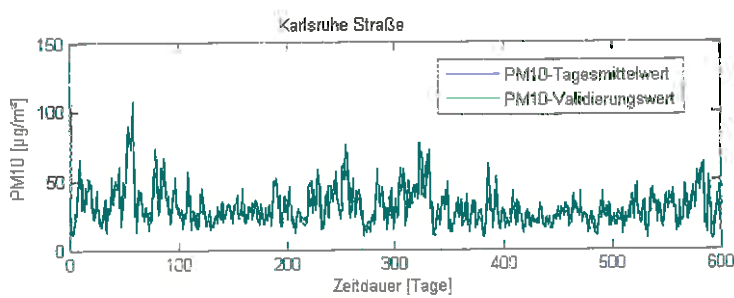
## ■ Aufbau des Neuronalen Netzes

- Übertragungsfunktionen (linear, linear ein- oder zweiseitig beschränkt, sigmoid, binär, radial-basiert ...)
- Feedback-Strukturen (Hopfield-Modell)
- Speicherelemente

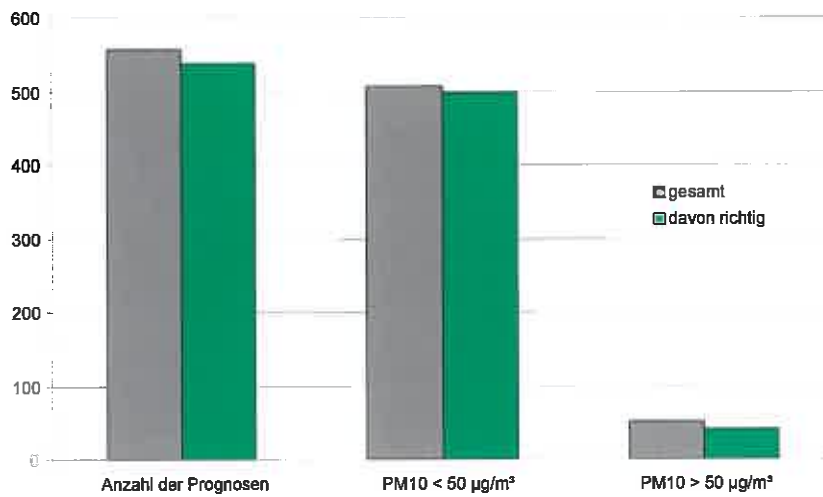


# PM10-Prognosemodell

## Beispiel Karlsruhe

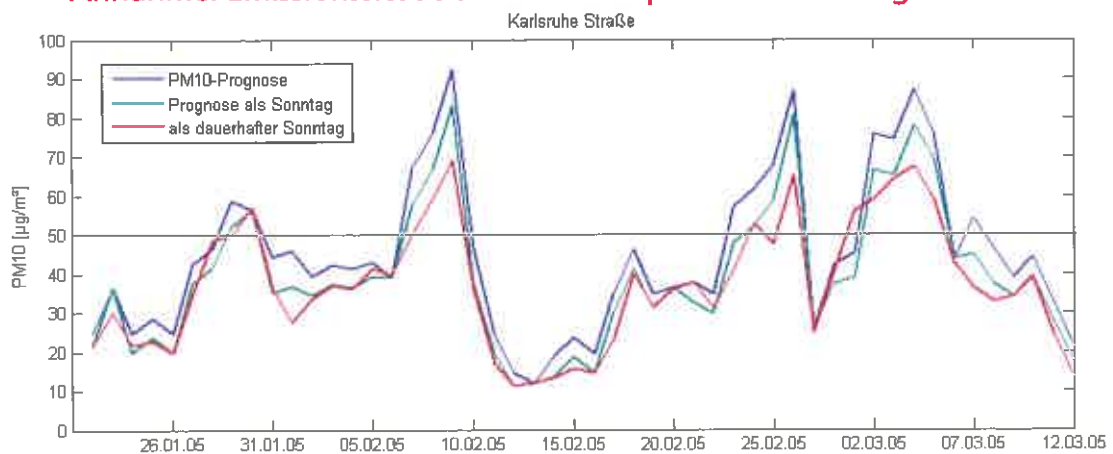


## PM10-Prognosemodell Prognosegüte



## PM10-Prognosemodell Modellgestützte Abschätzung des Reduktionspotentials

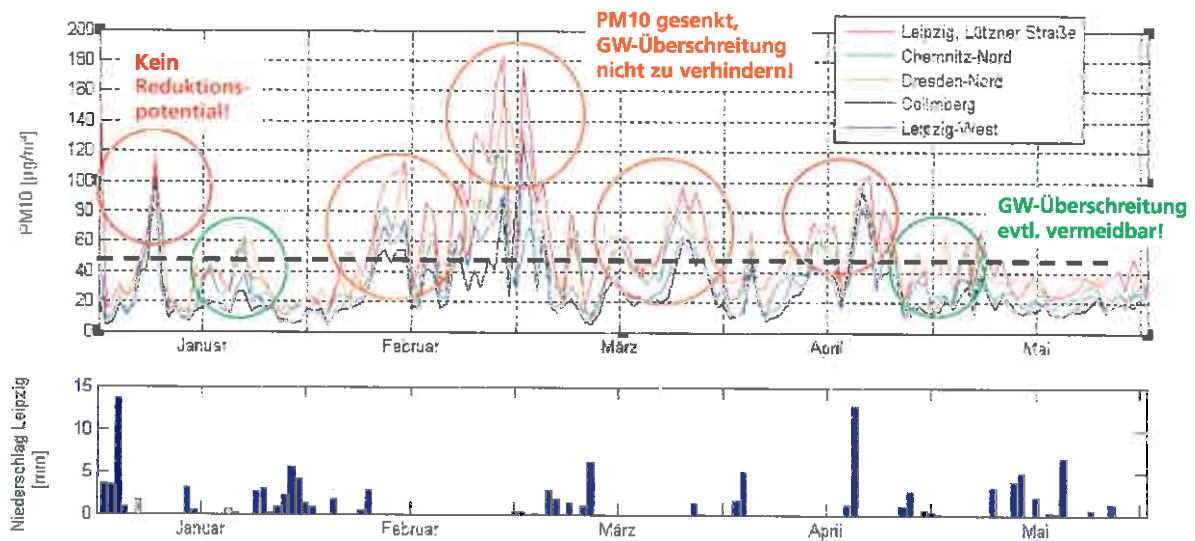
Annahme: Emissionssituation eines europaweiten Sonntages



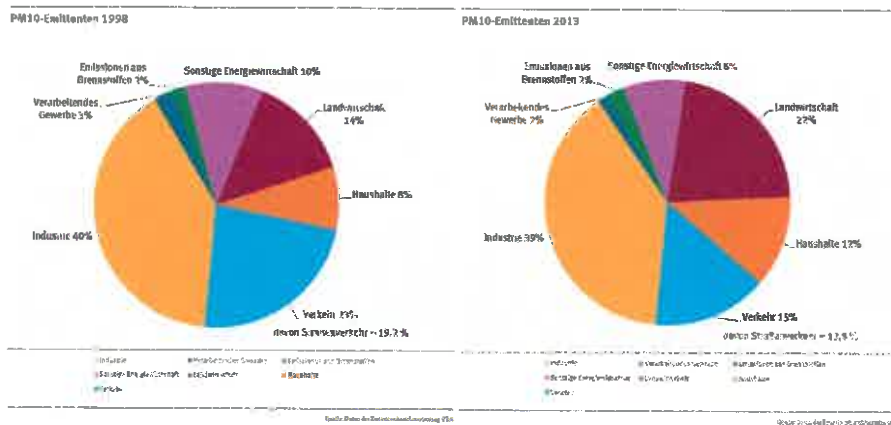
kurzfristig → 5 bis 8 µg/m<sup>3</sup>

langfristige Sonntagsruhe → max. 20 µg/m<sup>3</sup> PM10-Senkung

# Reduktionspotential durch Umweltzonen Maßnahmewirkung bei PM10-Episoden



## PM10-Emittenten (Quelle Umweltbundesamt)



- Anteil Straßenverkehr 13,8 %
- > 50 % davon aus Schwerlastverkehr/Busse → ca. 7 % Pkw-Anteil
- etwa die Hälfte Reifen- und Kupplungsabrieb → < 4 % aus dem Auspuff
- bei  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Jahresmittel  $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  → messtechnisch nicht erfassbar

---

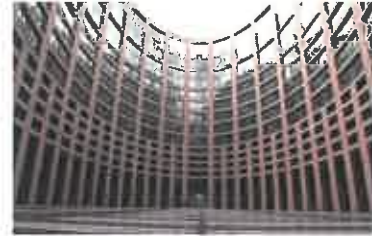
## Fazit der Untersuchungen PM10-Minderung versus NOx-Erhöhung

- Kritik an Feinstaub-Grenzwerten und verkehrsbeschränkenden Maßnahmen 2006
  - Studien im Auftrag des BMVBS, des VDA
  - Vorstellung der Ergebnisse im Umweltausschuss der EU

Die **Überschreitungen der Feinstaub-Tagesgrenzwerte** sind nahezu ausschließlich **meteorologisch** bedingt.

Die **Verbrennung von Rußpartikeln** führt zu einer **Erhöhung der Stickoxidemissionen!**

- keine Verschärfung der Grenzwerte
- Entscheidung zu Umweltzonen bereits gefallen



---

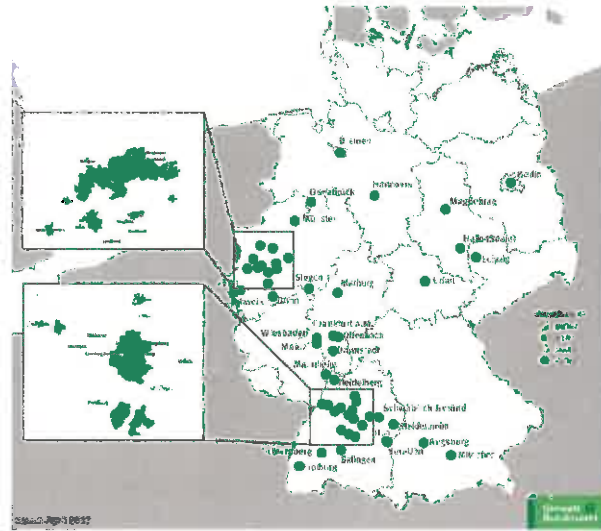
## Umweltzonen § 47 Luftreinhaltepläne

- (1) Werden ... Immissionsgrenzwerte ... überschritten, ... einen Luftreinhalteplan aufzustellen, welcher die **erforderlichen Maßnahmen zur dauerhaften Verminderung von Luftverunreinigungen** festlegt ...
- (4) Die Maßnahmen sind **entsprechend des Verursacheranteils** ... der **Verhältnismäßigkeit** gegen alle Emittenten zu richten, die zum Überschreiten der Immissionswerte ... beitragen.



## Umweltzonen Deutschland August 2017

- 55 bestehende Umweltzonen
  - Baden-Württemberg (22)
  - NRW (16)
  - Hessen (5), geplant Limburg
  - Bayern (3)
  - Sachsen-Anhalt (2)
  - Niedersachsen (2)
  - Rheinland-Pfalz (1)
  - Thüringen, Sachsen (je 1)
  - Berlin, Bremen



## Umweltzonen Europa August 2017

- 112 Umweltzonen, davon die Hälfte allein in Deutschland
  - 13 in den Niederlanden, Lkw und teilweise leichte Nfz.
  - 10 in Frankreich, nicht am WE, zeit- und wetterabhängig
  - 8 in Schweden, nur Nfz.
  - 8 in Italien, nur im Winter, alternierende oder Sonntagsfahrverbote
  - 6 in Österreich, nur Nfz.
  - 5 in Dänemark, nur Lkw und Busse > 3,5 t
  - 3 in Norwegen, nur Fzg. > 3,5 t
  - 2 in Belgien, nur Innenstadt, vorübergehende kostenpflichtige Erlaubnis
  - 2 in Großbritannien, nur Transporter, Busse und Lkw
- komplette »Enteignung« der Fahrzeugbesitzer nur in Deutschland



---

## Aufstellung der Messstationen

### Gesetzliche Rahmenbedingungen

- repräsentativer Messeinlass nicht in nächster Nähe von Quellen → Vermeidung einer unmittelbaren Einleitung von Emissionen
- max. Entfernungen
  - 10 Meter vom Fahrbahnrand
  - 25 Meter von verkehrsreichen Kreuzungen
- keine Beeinträchtigung des Luftstroms in einem Umkreis von 270°
- Vermeidung von Hindernissen wie Gebäuden, Balkonen, Bäumen, die den Luftstrom beeinflussen könnten
- »Hindernisse müssen normalerweise einige Meter entfernt sein.«

---

## Aufstellung der Messstationen

### Praktische Umsetzung



Stuttgart, Neckartor

- in einer Häusernische
- kein Luftaustausch möglich
- neben einem Container



## Aufstellung der Messstationen Messproben am 4. Dezember



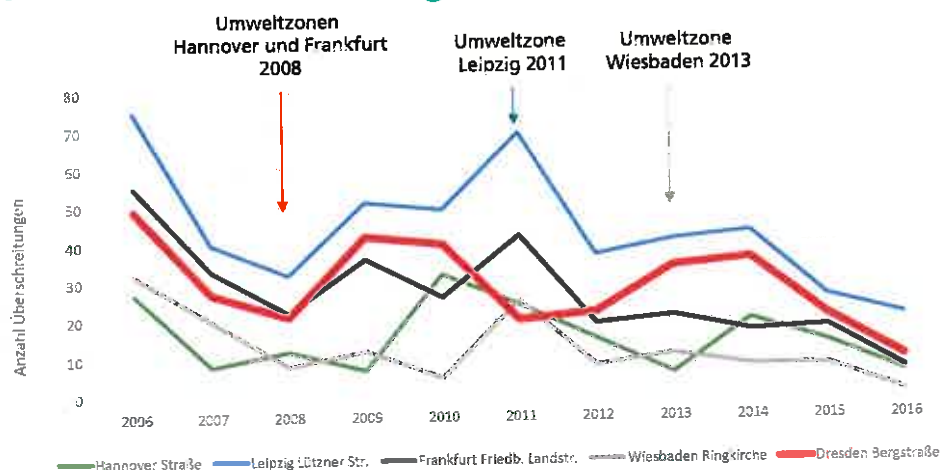
Stuttgart, Neckartor

- bereits auf der Brücke nur noch ca. 2/3 der NO<sub>x</sub>-Immissionen
- auf der gegenüberliegenden Seite am Parkrand 1/3 der Werte
- Feinstaub bei Nieselregen 5 bis 7 µg/m<sup>3</sup>

Fraunhofer

Fraunhofer  
IVI

## Wirkung Umweltzonen Anzahl Überschreitungen 2006 bis 2016



- keinerlei Wirkung eingeführter Umweltzonen nachweisbar
- meteorologische Einflüsse deutlich wirkungsvoller
- günstige Winterwetterlagen seit 2012

Fraunhofer

Fraunhofer  
IVI

## Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit von den Ausbreitungsbedingungen



Straßenschlucht



Autobahn

### Verkehrsbelastung

ø 25.000 Pkw/Tag  
ø 1.000 Lkw/Tag

ø 50.000 Pkw/Tag  
ø 10.000 Lkw/Tag

### Mittelwert PM10

ca. 40 µg/m<sup>3</sup>

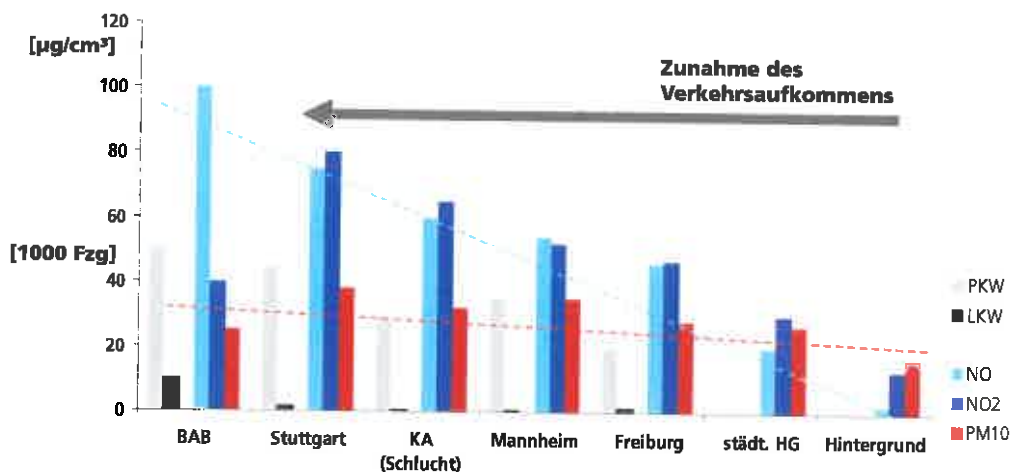
ca. 25 µg/m<sup>3</sup>

### Grenzwertüberschreitungen von 50 µg/m<sup>3</sup>

> 100 / Jahr

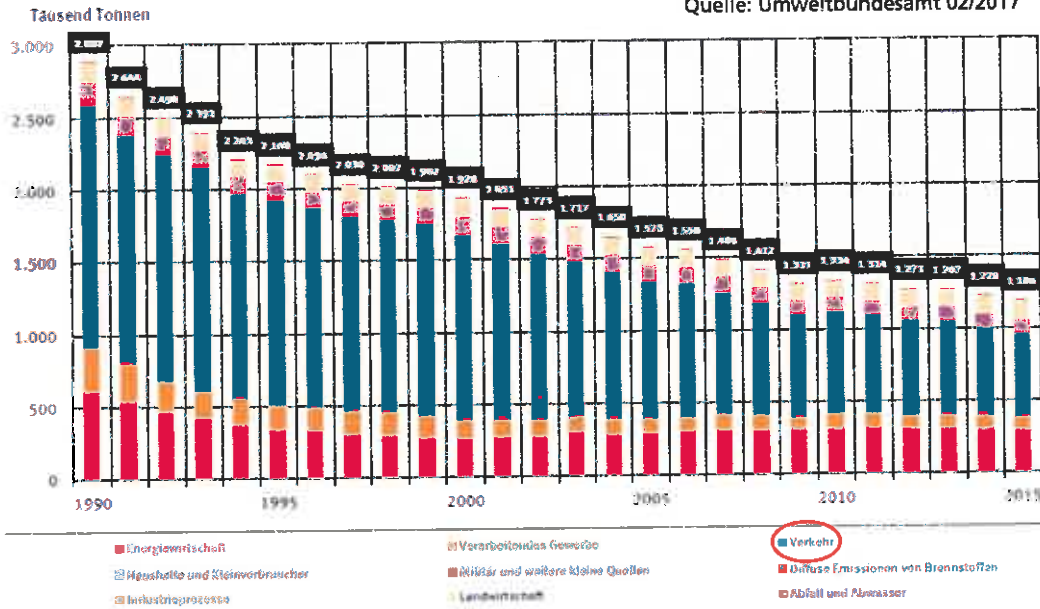
< 10 / Jahr

## Immissionen in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen

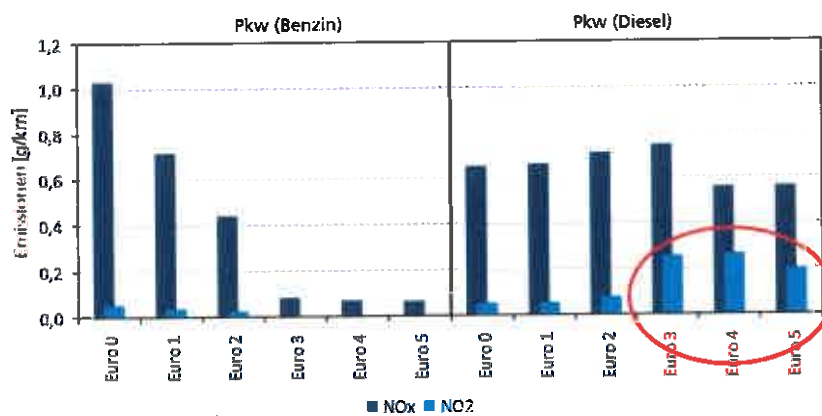


# Entwicklung der NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland seit 1990

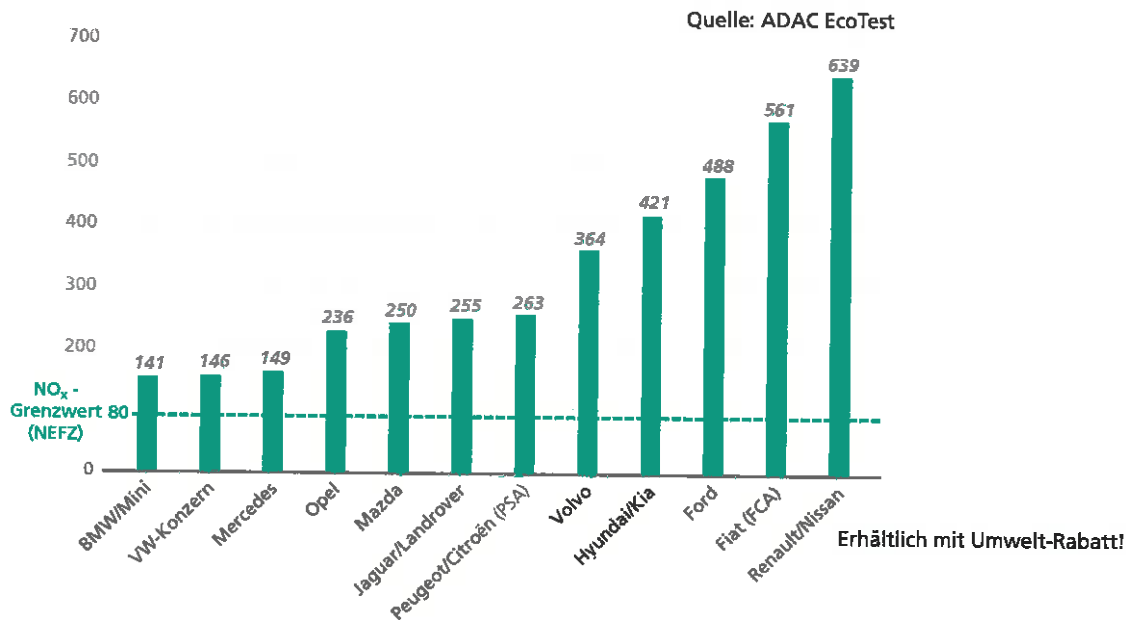
Quelle: Umweltbundesamt 02/2017



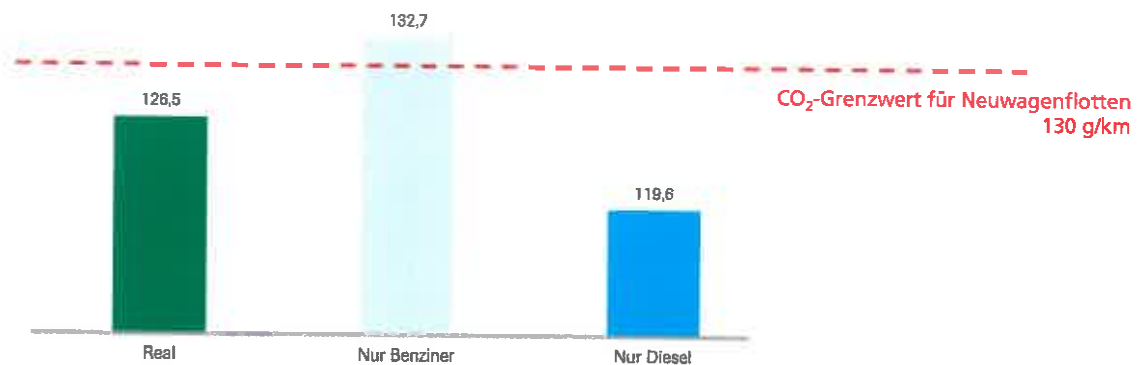
# NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Emissionen in Abhängigkeit der Euro-Norm



## NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Emissionen (mg/km) von Euro-6-Diesel-Pkw nach Herstellern



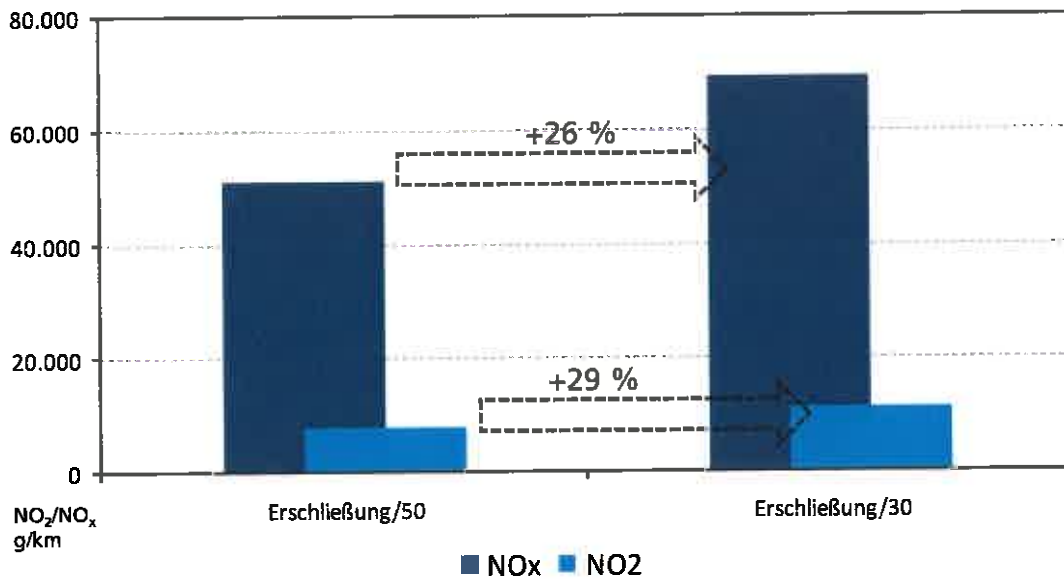
## CO<sub>2</sub>-Emissionen (g/km) nach Flottenzusammensetzung



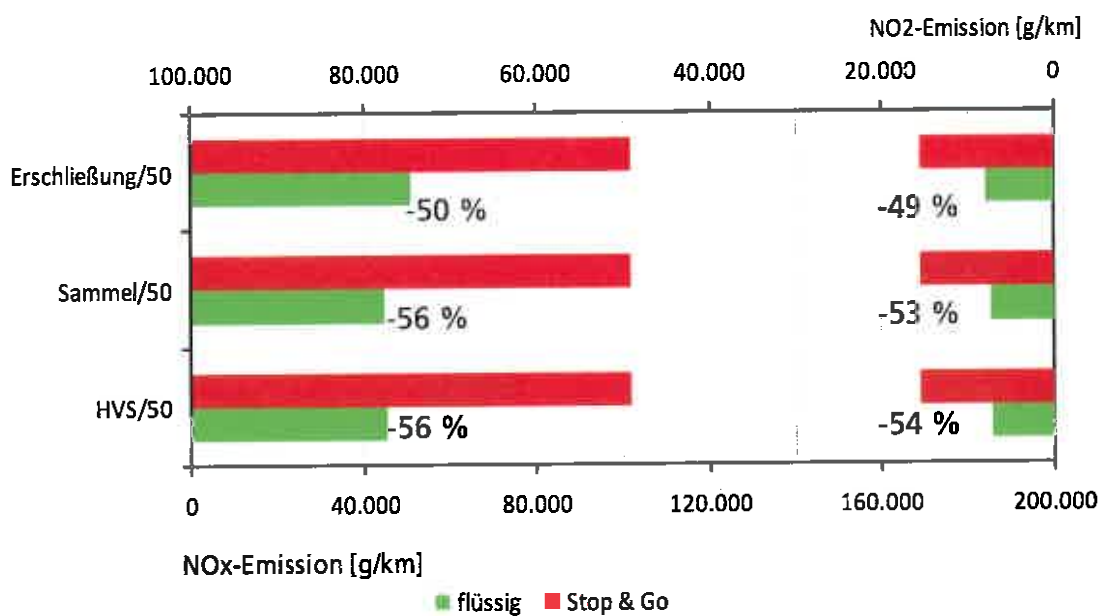
Der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Wert aller Neuwagen lag in Deutschland im Jahr 2016 bei 126,5 g/km - bei einem Dieselanteil von 45,9 %. Würde man alle Diesel durch Benziner aus dem gleichen Segment ersetzen, wäre der Wert deutlich höher: 132,7 g/km. Würden dagegen alle Benziner durch Diesel aus dem gleichen Segment ersetzt könnte man 119,6 g/km erreichen.

Quelle: VDA

## NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Erhöhung durch Einführung von Tempolimits

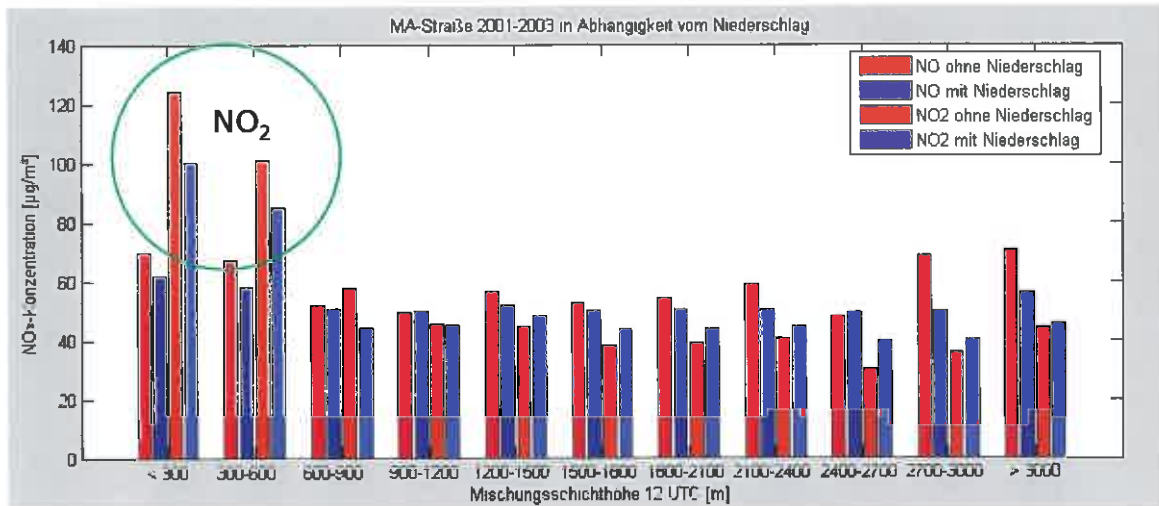


## NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Reduktionspotentiale durch Verkehrsverflüssigung



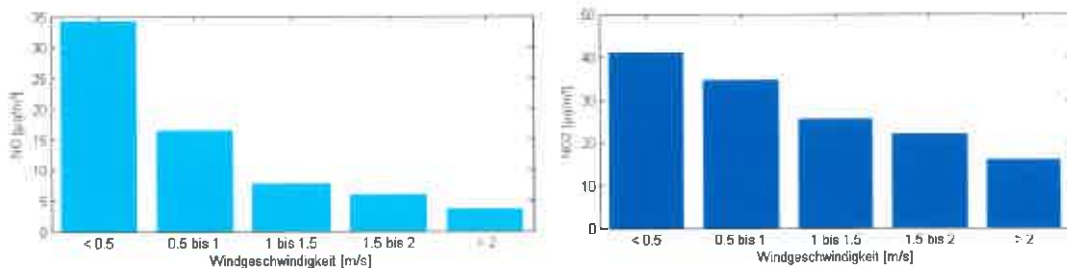


## Meteorologische Einflussfaktoren NO<sub>x</sub>-Immissionen – Mischungsschichthöhe



→ Mischungsschichthöhe < 600 m → hohe NO<sub>2</sub>-Konzentrationen

## NO<sub>x</sub>-Immissionen Meteorologische Einflussfaktoren



- mit zunehmender Windgeschwindigkeit
    - NO sinkt um 60 bis 80 Prozent
    - NO<sub>2</sub> sinkt um 50 Prozent
- Umleiten des Verkehrs auf gut belüftete Straßen

---

## Maßnahmen ohne NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Reduktionspotential

- Einführung von Tempolimits
  - 25 bis 30 % höher NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Emissionen
- Umtauschprämien / Fahrverbote
  - Pkw ausländischer Hersteller weit höhere NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Emissionen als die ausgesperrten Fahrzeuge deutscher Hersteller
  - Benziner bis zu 15 % höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen bei gleicher Leistung
- Software-Updates
  - Verschlechterung bzgl. Fahreigenschaften, Verbrauch
  - ggf. höhere Partikelemissionen bzw. Verstopfen der Filter
- Hardware-Nachrüstung
  - Mehrverbrauch, erhöhte CO<sub>2</sub>-Emissionen, zum Teil Leistungsreduzierung  
→ keine Langzeiterfahrungen, ggf. Garantieverluste, Motorschäden

---

## Maßnahmen mit NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>-Reduktionspotential

- Halbierung des Lkw-Durchgangsverkehrs
  - Minderung der Stickoxidemissionen analog eines kompletten Pkw-Fahrverbots
- dynamische Verkehrssteuerung
  - Verkehrsverflüssigung, Stauvermeidung, Verbrauchsminderung  
→ Senkung der Stickoxidemissionen
- Elektromobilität im Nutzfahrzeugbereich
  - Umrüstung der Busflotten und des Lieferverkehrs

---

## Umweltzonen gegen Feinstaub und NO<sub>x</sub>

### Fazit

- Diesel-Pkw
  - nicht messbarer Einfluss auf die Feinstaubbelastung
  - falsche Messgröße und falscher Grenzwert
    - Umweltzonen und Fahrverbote wirkungslos
  
- Überschätzung der gesundheitlichen Risiken
  - → Verunsicherung der Bevölkerung
  
  - Novellierung der Feinstaubrichtlinie hinsichtlich Abschaffung meteorologisch bedingter Überschreitungen
  - Prüfung der Platzierung der Messstationen
  - Dieselfahrverbote hinfällig

