

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Eisenbahn-Bundesamt

Relevanz bahnbedingter Emissionen - Erste Ergebnisse aus dem Projekt EmidES

Dr. Sabrina Michael

FB 83 “Umwelt und nachhaltige Mobilität”

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim
Eisenbahn-Bundesamt

EmidES: Emissionen und Immissionen aus dem
Schienenverkehr – Luftschadstoff-Monitoring und
Ausbreitungsberechnung

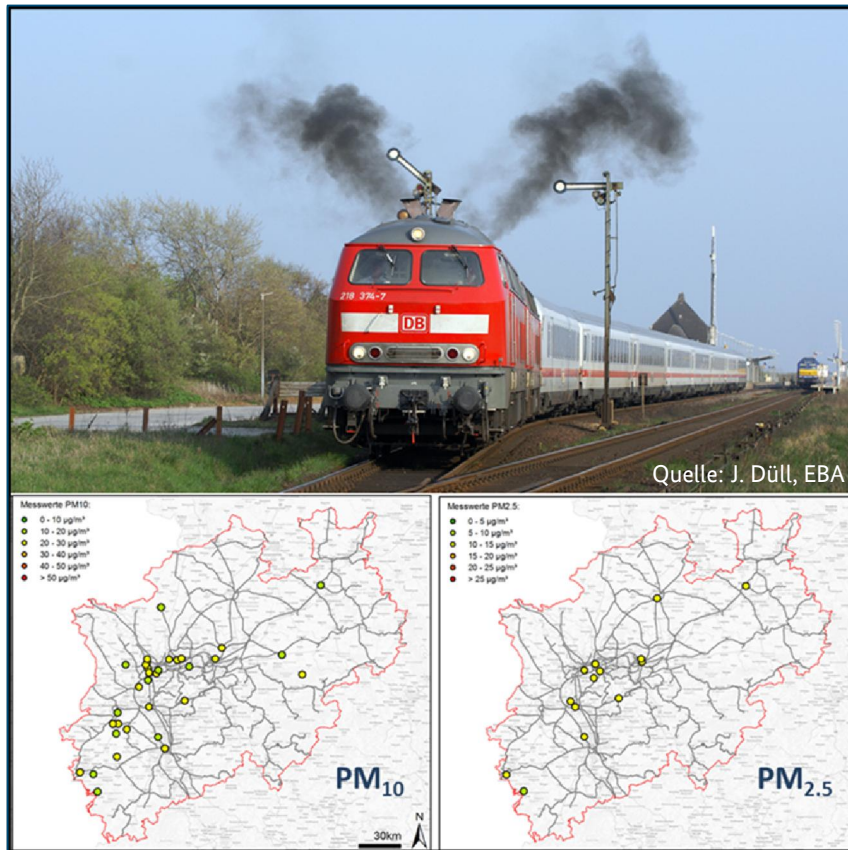
Motivation

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Quelle: Lohmeyer GmbH

- Für eine **nachhaltige Verkehrsentwicklung** mit steigenden Mobilitätsansprüchen müssen auch die vom Schienenverkehr freigesetzten **Emissionen und Immissionen** untersucht und bewertet werden.
- Über 180 Jahre Eisenbahnbetrieb und mehr als 33.000 Streckenkilometer (EdB) haben auch Auswirkungen auf die Umwelt und erfordern deshalb:
 - Gewässer- und Bodenschutz (Umweltmessstellen)
 - **Luftreinhaltung.**
- Als potentielle Quellen sind **Substanzeinträge** (organisch, anorganisch) aus dem Bahnbetrieb und den assoziierten Infrastrukturen von Bedeutung.
- Neben den **motorbedingten Emissionen** (Dieselfraktion) gewinnen die **Partikelemissionen infolge der Abriebe** sowie der fahrzeuginduzierten Aufwirbelung an Bedeutung.
- **Bisherige Datenlage, z. T. (Emissionsfaktoren) älter als 10 Jahre.**



- **Vorstudie des BMDV-Expertennetzwerkes zur Charakterisierung von Emissionen und Immissionen aus dem Schienenverkehr**
 - Sammlung bestehender Umweltdaten aus den Landesmessnetzen
 - Multifaktorielle und raumbezogene Analyse und Verschneidung der Feinstaubdaten/Messstellen mit dem dt. Schienennetz
 - **Keine repräsentativen Aussagen** für die Belastungen aus dem Schienenverkehr möglich
- **Primäre Datenquelle für Deutschland bildet das Bahn-Emissionskataster Schienenverkehr („BEKS“) der DB AG**
 - Luftschadstoffdaten (NO_x und Partikel-Emissionen) des **dieselbetriebenen Schienenverkehrs** in Deutschland (Summe DB + Dritte)
 - Lokale Auflösung als 2500 m Rastersummenwerte
 - NO_x = Stickoxide ($\text{NO} + \text{NO}_2$); PM_{10V} = verbrennungsbedingte Partikel als PM_{10} (Partikel < 10 μm)

Themenbereiche „EmidES“

Recherche und Monitoring

- Erfassung und Ermittlung von gasförmigen und partikulären Emissionen aus unterschiedlichen Quellen bzw. Bereichen des Schienenverkehrs selbst sowie seiner Infrastruktur

Schadstoffcharakterisierung

- Chemisch-analytische Charakterisierung von partikel- und gasförmigen Emissionen
- Ableitung von Indikatorsubstanzen/-parametern

**Emissionen und
Immissionen aus
dem
Schienenverkehr
„EmidES“**

Berechnung und Modellierung

- Räumliche und zeitliche Schadstoffausbreitung von gasförmigen und partikulären Immissionen
- Berücksichtigung des gesamten Schienennetzes sowie von bestimmten Tätigkeiten/Orten

GefahrenEinstufung und Risikobewertung

- Humantoxikologisch und ökotoxikologisch (umweltfachlich)
- Schadstoffeintrag/-austrag aus verschiedenen Quellen und Matrices

Projektziel „EmidES“

Recherche und Monitoring

- Erfassung und Ermittlung von gasförmigen und partikulären Emissionen aus unterschiedlichen Quellen bzw. Bereichen des Schienenverkehrs selbst sowie seiner Infrastruktur

Schadstoffcharakterisierung

- Chemisch-analytische Charakterisierung von partikel- und gasförmigen Emissionen
- Ableitung von Indikatorsubstanzen/-parametern

Entwicklung und Ableitung eines Maßnahmenkatalogs sowie möglicher Handlungsempfehlungen für den Umgang bzw. die Reduzierung/Optimierung von luftgetragenen Schadstoffen aus dem Schienenverkehr

Berechnung und Modellierung

- Räumliche und zeitliche Schadstoffausbreitung von gasförmigen und partikulären Immissionen
- Berücksichtigung des gesamten Schienennetzes sowie von bestimmten Tätigkeiten/Orten

GefahrenEinstufung und Risikobewertung

- Humantoxikologisch und ökotoxikologisch (umweltfachlich)
- Schadstoffeintrag/-austrag aus verschiedenen Quellen und Matrices

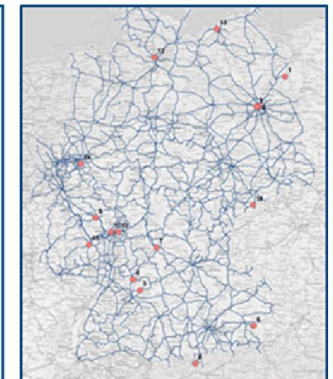
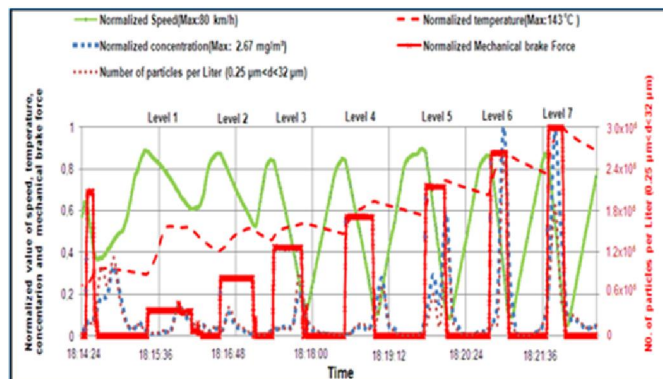
Literaturstudie, Auswertung und Systematisierung

Messkampagnen

- Bremsenprüfstand
- Freie Strecke
- Bahnhöfe
- Tunnel

Modellierung und Bewertung

- Emission
- Immission

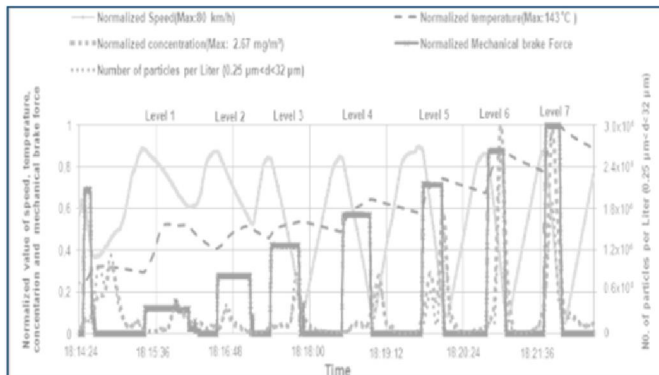


Literaturstudie,
Auswertung und
Systematisierung

- **Messkampagnen**
 - Bremsenprüfstand
 - Freie Strecke
 - Bahnhöfe
 - Tunnel

Modellierung und
Bewertung

- Emission
- Immission



Bremsenprüfstand

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



- **Exemplarische Messungen eines im Güterverkehr eingesetzten organischen Bremsbelags [COSIT 810 (1xBGU)]**
- **Messungen und Analysen erfolgen mit standardisierten Methoden**
 - Bestimmung von Abluftparametern/Strömungsgeschwindigkeiten (DIN EN ISO 16911-1)
 - Gravimetrische korngößenaufgelöste Impaktormessung im Abluftkanal nach VDI 2066 Blatt 5 (Vorabscheider, PM10, PM2,5 und PM1 sowie Backupfilter)
 - Partikelmessungen mittels Aerosolspektrometer (PM10, PM2,5 und PM1)
 - Elementanalyse mittels ICP-MS u. a: nach VDI 2267 Bl.1
 - Gesamt VOC-Messungen mittels FID nach DIN EN 12619
- **Prüfprogramm in Anlehnung an UIC 541-4, 5. Ausgabe, Prüfprogramm A1a**

Vertiefte Analysen und Versuche im DZSF-Forschungsvorhaben „Größenspezifische und räumliche Verteilung von verkehrsbedingten Abrieben und partikulären Emissionen“

Prüfprogramm

Prüfprogramm in Anlehnung an UIC 541-4, 5. Ausgabe, Prüfprogramm A1a

Im Fokus der Untersuchungen stehen Untersuchungsszenarien des Güterverkehrs in Verbindung mit Stoppbremsungen und Bremsprofilen an Haltepunkten und Bahnhöfen mit verschiedenen Nutzungsintensitäten.

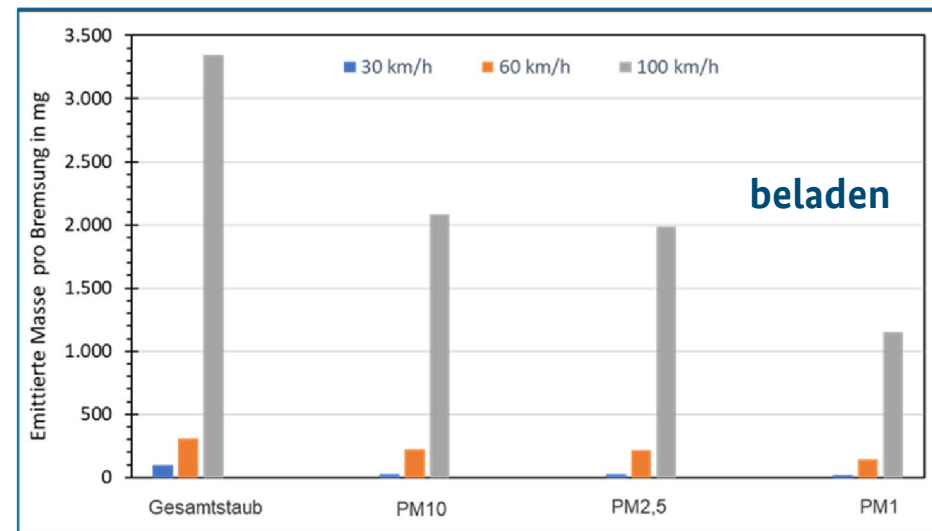
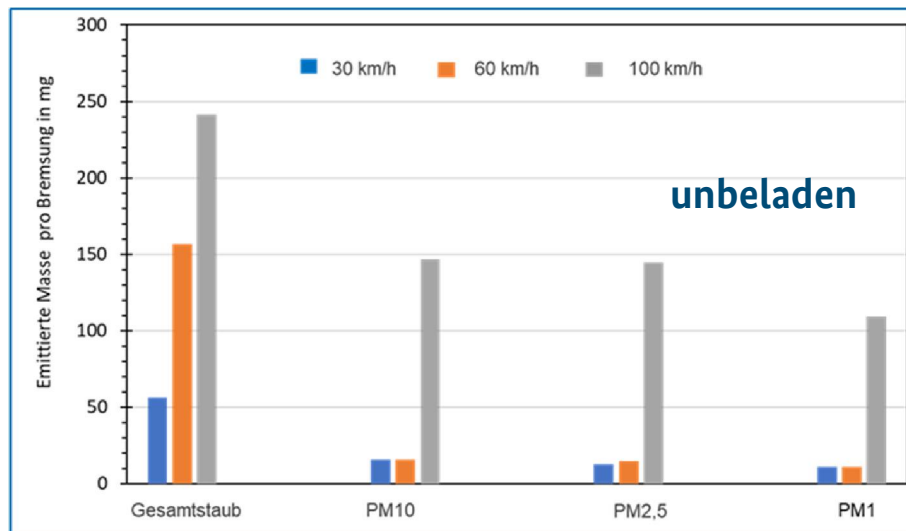
Bremsung Nr. und Typ		Anfangsgeschwindigkeit	Endgeschwindigkeit	Gesamt- F_B je Rad	Anfangstemperatur	Beladung	Versuchsnummer
		v	v ₃	F _B	Θ ₀		
Anzahl		km/h	km/h	kN	°C		
50	Anhalten	30	0	9	90	beladen	1
50	Anhalten	30	0	38	90	beladen	2
50	Anhalten	60	0	38	90	beladen	3
50	Anhalten	100	0	38	90	beladen	4
50	Anhalten	30	0	9	90	leer	5
50	Anhalten	60	0	9	90	leer	6
50	Anhalten	100	0	9	90	leer	7
5 Mal: 14 Regulierbremsungen + 1 Stoppbremsung, in regelmäßigen Abständen von 180 s („Sägezahn“-Simulation)							8
14	Abbremsen	75	45	5	60	beladen	
1	Anhalten	75	0	5	60	beladen	
3 Mal: 16 Regulierbremsungen + 1 Stoppbremsung, in regelmäßigen Abständen von 180 s („Sägezahn“-Simulation)							9
16	Abbremsen	75	45	9	60	beladen	
1	Anhalten	75	0	9	60	beladen	
1 Mal: 11 Regulierbremsungen + 1 Stoppbremsung, in regelmäßigen Abständen von 180 s („Sägezahn“-Simulation)							10
11	Abbremsen	75	45	1.5	60	beladen	
1	Anhalten	75	0	1.5	60	beladen	

Variationen der einzelnen Schritte des Prüfprogramms umfassen die **Anfangsgeschwindigkeit**, die **Anpresskraft** sowie die **abzubremsende Masse**.

Nach jedem der zehn Bremszyklen wird der Materialverlust bzw. der Abrieb der Bremsbeläge gravimetrisch bestimmt.

„Sägezahn-Simulation“:
Fortlaufende Variation der Geschwindigkeiten jeweils zwischen 75 km/h und 45 km/h.

Prüfprogramm: Stoppbremsungen



- Während für die Geschwindigkeitsbereiche 30 km/h und 60 km/h ähnliche Partikel-Konzentrationsbereiche nachzuweisen sind, **verzehnfacht sich die emittierte Masse pro Bremsung** bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von **100 km/h** zwischen unbeladenem und beladenem Zug.
- Bestimmung der Abriebmengen in Abhängigkeit vom **Bremsprofil**, der **Bremskraft** und dem **Bremsbelag**.
- Inhaltsstoffanalysen der PMx-Filterproben zeigen **Eisen als Hauptbestandteil** sowie Barium, Aluminium, Magnesium und Zink. In Spuren konnte darüber hinaus Kupfer, Chrom, Nickel und Molybdän nachgewiesen werden.
- Die **VOC-Konzentrationen** lagen für den Messaufbau **unterhalb der Bestimmungsgrenze** (0,5 ppm).

Feldmessungen

▪ **Standortauswahl erfolgte anhand eines umfangreichen Kriterienkataloges und Entscheidungsbaumes**

Mögliche Parameter:

- Streckenauslastung
- Nutzungs- (Güter- oder Personenverkehr) und Streckenprofil
- Traktionsart
- vorliegende Infrastruktur
- meteorologische Einflussgrößen und Belüftung sowie lokale Emittenten

▪ **Identifizierte Standorte:**

Freie Strecke

- Ötisheim
- Messzeitraum:
10.2021 bis 04.2022
- SPV/SGV: 64/68
- Ausgeglichenes
Nutzungsprofil

Art der Lokomotive / Datum	04.11.2021		02.03.2022		03.03.2022	
	Züge/ Tag	Anteil	Züge/ Tag	Anteil	Züge/ Tag	Anteil
Personennahverkehr	62	46%	56	45%	58	48%
Personenfernverkehr	2	1%	4	3%	2	2%
Güterverkehr (Elektrisch)	34	25%	37	30%	42	35%
Güterverkehr (Diesel)	4	3%	6	5%	5	4%
Güterverkehr (unbestimmt)	30	22%	12	10%	8	7%
Sonstige (Elektrisch)	1	1%	2	2%	2	2%
Sonstige (Diesel)	2	1%	7	6%	3	3%
Summe:	135	-	124	-	120	-

Rangierbahnhof

- Kornwestheim
- Messzeitraum:
05.2022 bis 10.2022

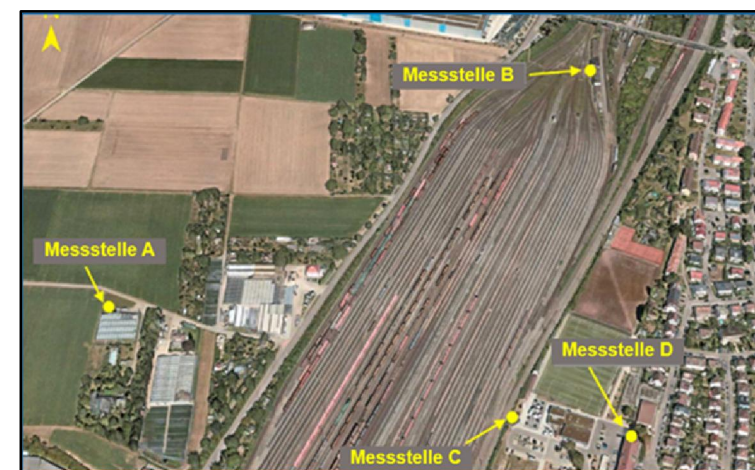


Standort verfügt über eine Leistung von ca. 20 000 Lokbetriebsstunden pro Jahr, was etwa 55 Betriebsstunden pro Tag entspricht

Freie Strecke: Ötisheim



Rangierbahnhof: Kornwestheim



- Jeweils vier Immissionsmesspunkte
- Erfassung der Luftschadstoffsituation im Sinne eines Luv (Hintergrundbelastung) – Lee (Gesamtbelastung) – Messkonzeptes auf einem Querprofil
- Im Fokus steht hierbei die Messung der Partikel (PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁) sowie der Stickstoffoxidbelastung (NO_x, NO₂) mittels standardisierter Verfahren
- Ergänzend erfolgen die Ermittlung von meteorologischen Parametern sowie die Zuordnung der Aktivitätsdaten der vorbeifahrenden Züge mittels Videoerfassung

Feinstaub an der freien Strecke Ötisheim

PM_x-Immissionen an der freier Strecke (*Gleiche Korrekturfaktoren wie bei PM₁₀)

Mittelwert Zeitraum 01.10.2021 – 28.02.2022 an Messstelle A (100 m) Messhöhe: 2 m			
Komponente	Streulicht Konzentration in µg/m ³	Gravimetrie Konzentration in µg/m ³	Zusatzbelastung in Bezug auf Messstelle D in µg/m ³
PM ₁₀	13,5	13,2	2,1
PM _{2,5} *	12,9 (95 %)	-	1,8
PM ₁ *	12,2 (91 %)	-	1,8
Mittelwert Zeitraum 01.10.2021 – 28.02.2022 an Messstelle B (5 m) Messhöhe: 2,8 m			
Komponente	Streulicht Konzentration in µg/m ³	Gravimetrie Konzentration in µg/m ³	Zusatzbelastung in Bezug auf Messstelle D in µg/m ³
PM ₁₀	13,4	12,8	2,0
PM _{2,5} *	11,2 (84 %)	-	0,2
PM ₁ *	10,1 (75 %)	-	-0,3
Mittelwert Zeitraum 01.10.2021 – 28.02.2022 an Messstelle C (55 m) Messhöhe: 2 m			
Komponente	Streulicht Konzentration in µg/m ³	Gravimetrie Konzentration in µg/m ³	Zusatzbelastung in Bezug auf Messstelle D in µg/m ³
PM ₁₀	12,9	12,3	1,4
PM _{2,5} *	10,8 (84 %)	-	-0,3
PM ₁ *	9,6 (74 %)	-	-0,9
Mittelwert Zeitraum 01.10.2021 – 28.02.2022 an Messstelle D (80 m) Messhöhe: 2 m			
Komponente	Streulicht Konzentration in µg/m ³	Gravimetrie Konzentration in µg/m ³	Zusatzbelastung in Bezug auf Messstelle D in µg/m ³
PM ₁₀	11,4	11,6	0,0
PM _{2,5} *	11,1 (97 %)	-	0,0
PM ₁ *	10,4 (91 %)	-	0,0

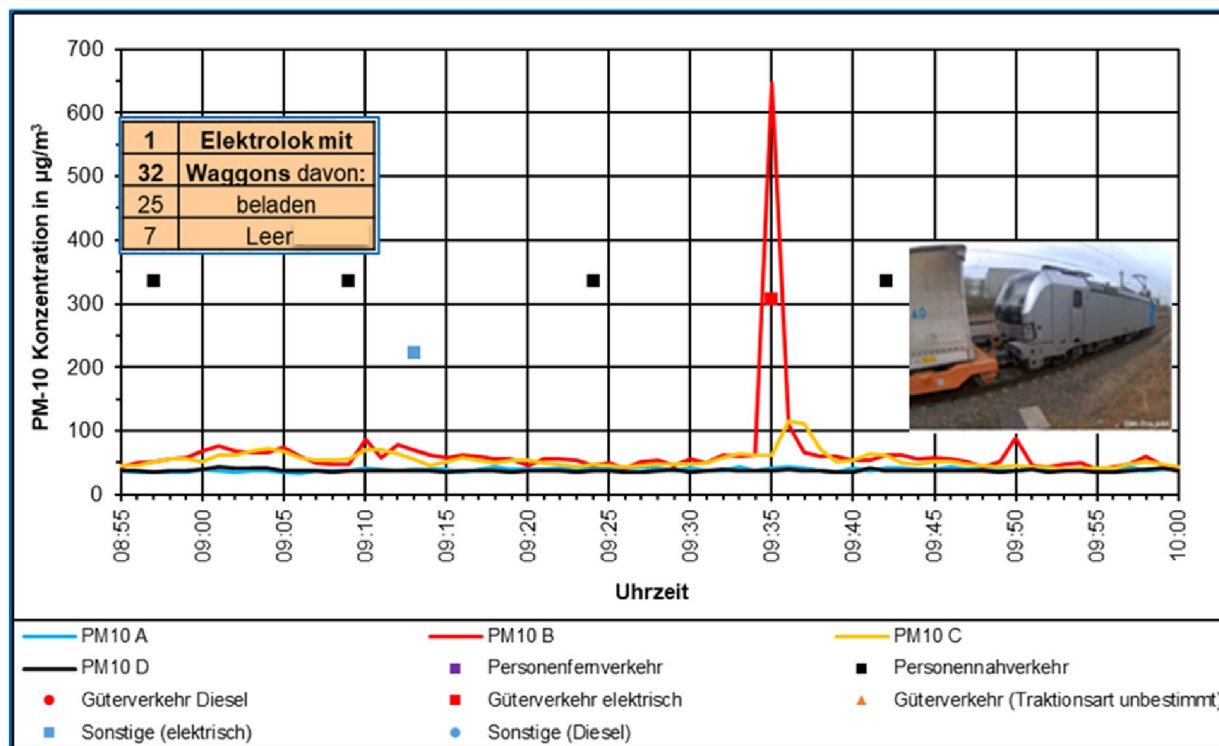
Die **NO₂**-Gesamtbelastung (< 14 µg/m³) weist im **Mittel keine Überschreitung** des geltenden Grenzwertes der 39. BImSchV auf.

Die **abgeleiteten** bahnbedingten **Zusatzbelastungen** betragen im **Langzeitmittel** für den Standort „Freie Strecke“ < 2 µg/m³ (PM₁₀) sowie < 1 µg/m³ für NO₂.

Aufgrund der bundesweit erhöhten Hintergrundbelastungen im Monat März wurde dieser als Ausreißer eingestuft und bei den Langzeitmittelwerten nicht berücksichtigt.

Analyse von Einzelereignissen

Emissionsbelastung bei einer Güterzug-Vorbeifahrt (Elektrotraktion)



- PM10-Gesamtbelastung Güterzug im Maximum bei ca. **650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** durch Turbulenz/Wirbelschlepe
- Nach 2 Minuten Reduzierung auf ca. **60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**
- Zuginduzierte **Wirbelschlepe** (fahrzeugerzeugte Turbulenz) führte mit einem **zeitlichen Versatz** von 1 Minute auch an Messstelle C zu einer Erhöhung der Partikelkonzentration (**110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**)
- Die PM10-**Hintergrundbelastung** (Messstelle D) lag zu diesem Zeitpunkt bei **30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$**
- **Personennahverkehrszüge zeigen geringere Erhöhungen** der PM10-Konzentrationen mit einem Spitzenwert von ca. **90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . (→ veränderte aerodynamische Eigenschaften oder Abriebbedingungen)

Feinstaub an einem Rangierbahnhof Kornwestheim

PMx-Immissionen Rangierbahnhof Kornwestheim (*Gleiche Korrekturfaktoren wie bei PM10)

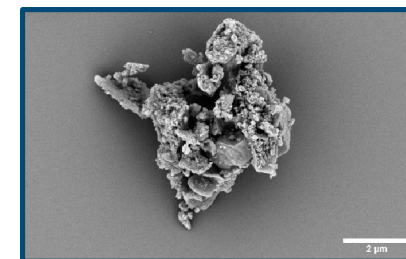
- Die ermittelte PMx-Zusatzbelastung weist nur geringe Unterschiede zwischen Messstelle A ($< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Messstelle D ($1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) auf.

Mittelwert PMx-Gesamtbelastung im Messzeitraum 01.06.2022 – 01.07.2022 an Messstelle B (5 m); Messhöhe: 2,8 m				Zusatzbelastung in Bezug auf	
Komponente	Streulicht Konzentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Gravimetrie Konzentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Standardabweichung $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Messstelle A $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Messstelle D $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	15,2	14,9	9,1	0,5	1,5
PM2,5*	9,5 (62%)	-		1,3	-1,4
PM1*	7,1 (47%)	-		1,2	-2,2
Mittelwert PMx-Gesamtbelastung im Messzeitraum 01.06.2022 – 01.07.2022 an Messstelle C (7 m); Messhöhe: 2 m				Zusatzbelastung in Bezug auf	
Komponente	Streulicht Konzentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Gravimetrie Konzentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Standardabweichung $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Messstelle A $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Messstelle D $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	15,3	15,0	9,0	0,6	1,6
PM2,5*	8,7 (57%)	-		0,6	-2,2
PM1*	6,4 (42%)	-		0,5	-2,9

- Der Mittelwert **NO₂-Belastung** liegt bei $9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MS A), $12,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MS B), $11,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MS C) und $11,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MS D).
- Die durch den Schienenverkehr verursachte **NO₂-Zusatzbelastung** beträgt im Untersuchungszeitraum im Mittel **$3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$** .

Fazit und Ausblick

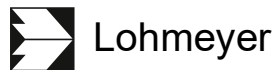
- Die durchgeführten Messungen liefern erste Daten im Hinblick auf Partikelkonzentrationen, Größenverteilung und chemische Zusammensetzung sowie Stickstoffoxid-Konzentrationen an unterschiedlichen bahnbezogenen Infrastruktureinrichtungen.
- Mit Hilfe der gewonnenen Daten können aktuelle Emissionsfaktoren (motorbedingt und nicht motorbedingt) abgeleitet und realitätsnahe Emissions- und Ausbreitungsberechnungen (bundesweit) durchgeführt werden.
- Prüfstanduntersuchungen ermöglichen ein vertieftes Verständnis von Abriebprozessen und Bremsvorgängen.
- Weitere Untersuchungen an einem ober- und unterirdischen Personenbahnhof sowie einem Eisenbahntunnel laufen bzw. sind geplant.
- Verknüpfung der Projektergebnisse mit Daten des DZSF-Umweltmonitorings zu einer umfassenden toxikologischen und umweltfachlichen Gefahrenbeurteilung und Risikobewertung.



REM-Bild von Bremsabrieb (S. Wieland, Universität Bayreuth)

Projektkonsortium

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Lohmeyer GmbH (Auftragnehmer)
Niederlassung Dresden



IFB Institut für Bahntechnik GmbH
Niederlassung Dresden

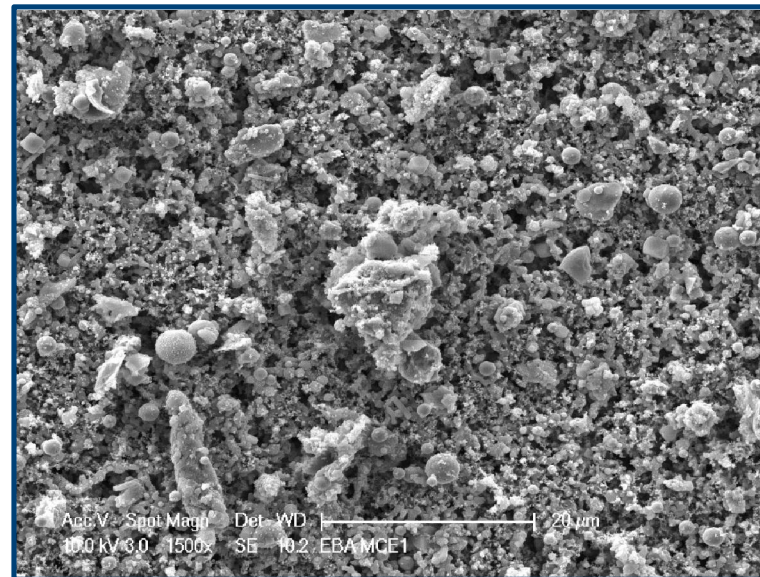


Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik - IFK
Abteilung Reinhaltung der Luft
Universität Stuttgart



**Fraunhofer Institut für Toxikologie und
Experimentelle Medizin**
Bereich Chemikalienbewertung und Toxikologie
Hannover

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Verwendung von standardisierten Verfahren

Komponente	Messgerät	Messprinzip	Position
PM10	sequentielle Sammler	Gravimetrie	A, B, C, D
PM10, PM2,5, PM1	EDM 180, Fa. Grimm	Streulicht Spektrometrie (Photometrie)	A, B, C, D
NO _x , NO ₂ , NO	Ambient Air Monitor NO _x , APNA 360 Fa. Horiba	Chemilumineszenz	B
NO ₂	Passivsammler, Fa. Passam	Diffusion und Absorption	A, B, C, D
Windrichtung und Geschwindigkeit	ATMOS 22, Fa. METER Environment	Ultraschallanemometer	(A), B
Temperatur und relative Feuchte	HOBO, Fa. Onset		(A), B
Videoaufnahme	Videokamera RLC-511, Fa. Reolink		B

- **Kombination** aus diskontinuierlichen **gravimetrischen PM10- und kontinuierlichen Partikel-Streulichtmessungen** ermöglicht die Kalibrierung der Streulichtmessungen mit Hilfe des Referenzverfahrens sowie die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der beprobten Partikel (Quellenzuordnung).
- Optisches Verfahren ermöglicht zeitlich **hochaufgelöste Datenreihen**, die Erfassung der **Partikelgrößenverteilung** sowie die **Langzeitanalyse**.
- **Meteorologische Parameter** sowie Zuordnung der Aktivitätsdaten der vorbeifahrenden Züge mittels **Videoerfassung**
- **Analyse PM10-Filterproben** inkl. Blank-Filter auf 24 Elemente mittels Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry (ICP-MS)