

Aus der Klinik für Geriatrie und Altersmedizin
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Schützt die 39. BImSchV vor Feinstaub?
Sonderfall Pflegeheime

Protects the 39th BImSchV from particulate matter?
Nursing homes as a special case

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum medicinalium (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Katja Saller

Datum der Promotion: 30.11.2023

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	VI
Abstract	VII
1 Einleitung	1
2 Material und Methodik	2
3 Ergebnisse	3
4 Studien zu gesundheitlichen Folgen von Feinstaub	5
4.1 Datenlage zur Gesundheitsbelastung durch Feinstaub	7
4.2 Corona – Lockdown Spaniens 2020	15
5 Die 39. BImSchV, Kritik und offene Fragen	20
5.1 Vorsorge und Schutz	20
5.2 Luftqualitätsstandards in deutschem Recht	23
5.3 Fragestellungen und Prozess zur Festsetzung von Grenzwerten	28
5.4 Begrifflich-definitive Unklarheiten der 39. BImSchV	32
5.5 Sonderstellung für Schiffs- und Flugverkehr	34
6 Kategorisierung, Definition und Filterung von Feinstaubfraktionen	36
6.1 Aerodynamischer Durchmesser und Sinkgeschwindigkeit	37
6.2 Rolle der Staubfilter bei gravimetrischen Feinstaub-Grenzwerten	39
7 Regionale Verteilung von Pflegeheimen im städtischen Bereich	43
8 Wirkung und Alternativen	50
8.1 Toxische Emissionen implizieren Immissionen giftiger Aerosole	50
8.2 Physiologische Wirkung von Feinstaub in der Atemluft	53
8.3 Mathematische Modellierung des inhalierbaren Anteils von Feinstaub	58
8.4 Zeitbezug Messtechniken für Feinstaub	61
9 Mediale und wissenschaftliche Resonanz, politische Bedeutung	63
9.1 Öffentliche Zweifel an der 39. BImSchV	66
9.2 Politik engagiert ‚wissenschaftliche Expertise‘	68
9.3 Relevanz des Themas innerhalb der deutschen Forschungsförderung	75
Literaturverzeichnis	81

Anhang	88
Eidesstattliche Versicherung	92
Lebenslauf	93
Danksagung	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wiss. Publikationen zu „Feinstaub in der Atemluft“ 1980-2020	5
Abbildung 2: Klinikeinweisungen wegen Herzinfarkt, vor und nach Lockdown, alle Behandlungen	15
Abbildung 3: Behandlung von Herzinfarkten mit Ballondilatation und STEMI.....	16
Abbildung 4: Anzahl Klinikeinweisungen vs. Feinstaub, Madrid 2003-2005, time-lag=0.....	18
Abbildung 5: Messstellen mit Überschreitungen des Tagesgrenzwerts von PM ₁₀ im 1. Halbjahr 2019.....	26
Abbildung 6: Bias of omitted variable.....	29
Abbildung 7: Bedeutung des moving average über 8 Stunden in der 39. BImSchV	31
Abbildung 8: Sinken aus Höhe h=10m in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser	39
Abbildung 9: Abscheidegrad in Trennfunktionen	40
Abbildung 10: Geografische Lage der Berliner Pflegeheime 2021.....	43
Abbildung 11: Geografische Lage der Münchener Pflegeheime 2021	43
Abbildung 12: Feinstaubbelastung eines Tages an verschiedenen Messstationen Berlins	44
Abbildung 13: Feinstaubbelastung eines Tages an zwei Messstationen Münchens.....	45
Abbildung 14: Anzahl pflegebedürftiger Personen in Deutschland	47
Abbildung 15: Kognitive Einschränkungen bei Heimbewohnern in Deutschland.....	48
Abbildung 16: Toxizität Luftbelastung; Vergleich GDI-Diesel.....	51
Abbildung 17: Eindringtiefe Feinstaub nach Partikelgröße (%).....	53
Abbildung 18: Relation Oberfläche-Masse bei Feinstaubpartikeln.....	55
Abbildung 19: Anthophyllit Asbest (Maßstab o. li.: 50 µm)	57
Abbildung 20: Inhalierbarer Anteil von Staubpartikeln nach Teilchengröße	59
Abbildung 21: Staubpartikel, inhalierbarer Anteil vs. d _{ae} bei Luftbewegung	60
Abbildung 22: Wissenschaftliche Publikationen & Presseberichte, Suchbegriff „Particulate Matter“ bzw. „Feinstaub“	63
Abbildung 23: PM ₁₀ -Verlauf (Original: Feinstaub PM ₁₀ – Jahresmittel 1996-2015).....	64
Abbildung 24: Energieverbrauch weltweit im Vergleich 1990 und 2008.....	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für Feinstaub in Deutschland.....	1
Tabelle 2: Bewertungen von Studien zur Luftbelastung und Gesundheit durch WHO & EPA.....	8
Tabelle 3: Air Pollution and Mortality in the Medicare Population, ökologische und meteorologische Merkmale	13
Tabelle 4: Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser	38
Tabelle 5: Prävalenzschätzung Demenz in Deutschland nach zwei Modellen	48
Tabelle 6: Staubpartikel im menschlichen Atemtrakt.....	54
Tabelle 7: Masse vs. Oberfläche von Fein- und Ultrafeinstaub.....	54
Tabelle 8: Forschungsausgaben in Euro (2012-18)	75
Tabelle 9: Stichwortsuche in Förderkatalog und Förderdatenbank	77
Tabelle 10: Investitionen der Helmholtz Gemeinschaft (eigene Berechnung)	78
Tabelle 11: Stichwortsuche in Umweltforschungsdatenbank UFORDAT	80

Abkürzungsverzeichnis

39. BImSchV	39. Bundesimmissionsschutzverordnung
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AUC	Area under the curve
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
CEN	Comité Européen de Normalisation
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
EMPA	Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPA	Environmental Protection Agency
EPI-Studien	Epidemiologische Studien
EUA, auch EEA	Europäische Umweltagentur, auch European Environment Agency
EuGH	Europäischer Gerichtshof
FuE	Forschung und Entwicklung
FuI	Forschung und Innovation
GBD	Global Burden of Disease
IHME	Institute for Health Metrics and Evaluation
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MPG	Max-Planck-Gesellschaft
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
UBA	Umweltbundesamt
WHO	Weltgesundheitsorganisation, Weltgesundheitsorganisation, World Health Organisation
WLTP	Worldwide Light-Duty Vehicles Test Procedure

Zusammenfassung

Gesundheitliche Folgen von Luftbelastungen sind durch die Art der Schadstoffe, ihre regionale Verteilung, die gesundheitliche Disposition der Menschen, altersbedingte Risiken und Vorerkrankungen, Differenzen zwischen Innenräumen und Außen, die gesellschaftspolitische Handhabung sowie durch internationale Unterschiede in hohem Maße heterogen.

Auch der Begriff ‚Luftbelastung‘ selbst wird in öffentlichen Debatten unterschiedlich verstanden und die gesetzlich festgelegten Grenzwerte der Schadstoffe werden immer wieder kontrovers diskutiert.

Ziel dieser Arbeit ist eine Beurteilung der Notwendigkeit sowie der aktuellen Realisierung des staatlichen Gesundheitsschutzes vor Gefahren durch Feinstaub in Deutschland. Die Differenz zwischen der aktuellen WHO-Empfehlung und den für Deutschland gültigen Grenzwerten ist dabei nur ein erklärungsbedürftiger Faktor. Während die WHO im dritten Quartal 2021 ihre Empfehlung für den Jahresgrenzwert von Feinstaub PM_{2,5} um die Hälfte ihrer bisherigen Empfehlung auf 5 µg/m³ reduziert hat, liegen die für die EU und Deutschland gültigen Werte nach wie vor bei 25 µg/m³.

Andere Punkte der aktuellen gesetzlichen Regelungen wie die univariate Herangehensweise, die vorgeschriebenen gravimetrischen Staubmessungen oder die Art der Verwendung und Verrechnung einzelner Messwerte erscheinen im Hinblick auf den Gesundheitsschutz als wenig sinnvoll.

Entsprechend tragen auch die aktuellen deutschen Feinstaubwerte zum Urteil der WHO bei, wonach bis zu 85 Prozent aller Stadtbevölkerungen Europas gesundheitsschädlichen Feinstaubwerten ausgesetzt¹ sind.

Obwohl insbesondere alte Menschen in besonderem Maß unter hoher Feinstaubbelastung leiden, liegen etwa 60% der städtischen Pflegeheime in den Innenbezirken der Städte, in denen die Luftbelastung signifikant über der durchschnittlichen Belastung liegt.

¹ BUND. o. J. *Feinstaub – eine Gefahr für Gesundheit und Klima* [Online]. Berlin: BUND. Verfügbar unter: <https://www.bund.net/themen/mobilitaet/schadstoffe/feinstaub/> [Abgerufen am 14.08.2021].

Abstract

Health consequences of air pollution are highly heterogeneous due to the type of pollutants, their regional distribution, people's health disposition, their age-related risks and pre-existing conditions, differences between indoor and outdoor, socio-political management, and international differences.

Also in public debates the term 'air pollution' itself is understood in different ways and the legally defined limits of the pollutants have been the subject of controversial discussions.

The aim of this paper is to assess the necessity and the current realisation of public health protection against the dangers of particulate matter in Germany. The difference between the current WHO recommendation and the limit values valid for Germany is only one factor that requires explanation. While the WHO reduced its recommendation for the PM_{2.5} annual limit value in the third quarter of 2021 by half of its previous recommendation to 5 µg/m³, the values valid for the EU and Germany and are still 25 µg/m³.

Other points of the current legal regulations, such as the univariate approach, the prescribed gravimetric dust measurements or the way in which individual measured values are used and accounted for, appear to make little sense in terms of health protection.

Accordingly, the current German particulate matter values also contribute to the WHO's verdict that up to 85 percent of all urban populations in Europe are exposed to particulate matter levels that are harmful to health.

Although elderly people in particular suffer from high levels of particulate matter, about 60% of urban nursing homes are located in the inner districts of cities where air pollution levels are significantly above average.

1 Einleitung

Luftverschmutzung ist auch in Europa eines der größten Umweltprobleme. Neben anderen Luftbelastungen wie Stickoxiden (NO_x), flüchtigen organischen Verbindungen, Schwefeldioxyden (SO_x), Kohlenmonoxid (CO) und Ammoniak (NH₃) spielt Feinstaub, der überwiegend durch Industrieprozesse, Verkehr, Landwirtschaft und Gebäudeheizungen entsteht, eine besondere Rolle.

Die Europäische Kommission geht nach einschlägigen Modellrechnungen davon aus, dass die EU-Bevölkerung - status quo - ab 2025 allein wegen der Luftbelastung durch Feinstaub pro Jahr 2,7 Millionen Lebensjahre und 82 Millionen Arbeitstage verlieren sowie 330 Millionen Tage mit Aktivitätseinschränkung erleben wird².

Für die Jahre 2007-2013 schätzte das Umweltbundesamt für Deutschland volkswirtschaftliche Verluste in Höhe von 153 Milliarden Euro pro Jahr³, die durch reduzierte Lebenserwartung wegen feinstaubbedingter Erkrankungen entstehen. Für das Jahr 2013 entsprach dies 5,4% des deutschen Bruttoinlandsprodukts.

Die Beurteilung und Limitierung der Feinstaubbelastung wird europaweit einheitlich durch die EU-Richtlinie 2008/50/EG geregelt, die auch die Festsetzung von Immissionsgrenzwerten enthält. In Deutschland erfolgte die nationale Umsetzung der EU-Vorgaben durch die 39. BImSchV.

Aktuell gelten für die Feinstaub-Fraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} folgende Grenzwerte:

Fraktion	Bezug	Grenzwert	Ausnahme
PM _{2,5}	Jahr	25 µg/m ³	-
	Tag	-	-
PM ₁₀	Jahr	40 µg/m ³	-
	Tag	50 µg/m ³	35 Tage / Jahr

Tabelle 1: Grenzwerte für Feinstaub in Deutschland

² HOLLAND, Mike 2014. *Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package*. S. 17.

³ KALLWEIT, D & BÜNGER, B 2015. *Feinstaub macht krank und kostet Leben-Berechnung jährlich entstehender Kosten durch die Feinstaubbelastung in Deutschland*. UMID: Umwelt und Mensch-Informationsdienst, 2, 96-72.

2 Material und Methodik

Im Gegensatz zu empirisch-naturwissenschaftlichen Arbeiten erfordert die hier verfolgte Thematik einen breiten interdisziplinären Ansatz. Allein die kritische Analyse der z.Z. gültigen 39. BImSchV benötigt juristische, politische, historische, physikalisch-thermodynamische, medizinische und gesundheitspolitische Erörterungen.

Zur Beurteilung des Forschungsstands sowie der kritischen Analyse der Ist-Situation erfolgte zunächst eine Sichtung von über 300 einschlägigen Forschungsergebnissen über die biomedizinische Onlinebibliothek „PubMed“. Die Auswahl erfolgte auf Basis der Kriterien Stichprobenumfang, Beobachtungszeitraum, Signifikanzniveau, Teststärke und ggfs. der Frequenz der Zitierungen. Der daraus abgeleitete Stand der Forschung wird in Kapitel 4 dargestellt.

Die in der Gesetzgebung verwendeten Konzepte - gleitende Mittelwerte, gravimetrische Staubbestimmung, Datenbereinigung und Indikatorbildung, Bestimmungen über Lokalisation der Messstandorte, aerodynamischer Durchmesser, Filtertrennfunktionen etc. werden auf ihre Bedeutung hinsichtlich der Erreichung der offiziellen Zielsetzung „zum Schutze der menschlichen Gesundheit“ untersucht.

Das Konzept des ‚wissenschaftlichen Beweises‘ und seine Nutzung zur Positionierung im aktuellen öffentlichen Diskurs zum Thema werden kritisch dargestellt.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Negative, gesundheitliche Folgen von Feinstaub in der Atemluft gelten nach den Ergebnissen aktueller epidemiologischer Studien auch deutlich unter den europäischen Grenzwerten als gesichert.
2. In deutschen Großstädten befinden sich nahezu 60% der Pflegeheime in Innenstadtbezirken mit hohen Belastungen.
3. Das Gewicht des Feinstaubes pro Volumeneinheit ist kein geeignetes Kriterium für dessen gesundheitliches Gefährdungspotenzial.
4. Mit den gravimetrischen Vorgaben bezüglich Feinstaub ignoriert die 39. BIm-SchV u.a. dessen statistische Verteilung der Partikelgröße, Form der Partikel, chemische Zusammensetzung und Toxizität.
5. Die verwendeten gleitenden Mittelwerte stündlicher Messungen kaschieren die Bedeutung tageszeitlicher Schwankungen. Analog bilden Jahresmittel jahreszeitliche Schwankungen und Problemlagen nicht ab.
6. Die Corona Pandemie liefert in Kombination mit früheren Erkenntnissen den Nachweis für nicht nur kumulative, sondern auch zeitlich unmittelbare Gesundheitsschäden durch Feinstaub $PM_{2,5}$, was die Verwendung von Mittelwerten bei der Grenzwertbestimmung als überaus fragwürdig erscheinen lässt.
7. Ohne Berücksichtigung von Ausmaß und Verteilung der jährlich zulässigen 35 Tage mit Grenzwertüberschreitungen ist deren Gefährdungspotenzial nicht bestimmbar.
8. Grenzwerte für PM_{10} und $PM_{2,5}$ wurden seit ihrer Einführung (2005/ 2015) nicht nach unten korrigiert, obwohl eine große Zahl von Studien zeigen, dass erhebliche gesundheitliche Wirkungen von Feinstäuben bereits deutlich unter den vorgegebenen Grenzwerten auftreten und die WHO entsprechend wesentlich niedrigere Grenzwerte empfiehlt.
9. Im Gegensatz zu den gesetzlichen Vorgaben für die Außenluft sind Feinstaubmessungen z.B. in Innenräumen mittels direct-reading Instrumenten längst Standard, die sämtliche der unter 4. genannten Parameter präzise bestimmen und unmittelbar online zugänglich machen können.

10. Die Definition der Staubfraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ durch den aerodynamischen Durchmesser hat für sehr feine und ultrafeine Stäube keine Bedeutung.
11. Die 39. BImSchV⁴ nennt für jede der Luftbelastungen PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , NO_x , Benzol, Blei, CO etc. univariate Grenzwerte, obwohl die gesundheitliche Gesamtbelastung sich erst durch multivariate Kombinationen der Einzelbelastungen bestimmt.
12. Das mediale Intermezzo ‚Köhler-Leopoldina‘ erwies sich als anschauliches Beispiel zur Relation von Wissenschaft- und Politik.
13. Die in Deutschland online nicht frei verfügbaren DIN-EN-Normen bzgl. Luftbelastungen behindern Forschungen zum Thema.

⁴ 39. Bundesimmissionsschutzverordnung: Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010, die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juli 2018 geändert worden ist.

4 Studien zu gesundheitlichen Folgen von Feinstaub

In Abbildung 1 zeigt die exponentielle Zunahme der Anzahl wissenschaftlicher Publikationen bezüglich der gesundheitlichen Folgen von Luftbelastungen allein in der medizinischen Datenbank 'Pub-Med'⁵ dargestellt. Angesichts des enormen Umfangs der bis 2020 vorliegenden Forschungsberichte muss sich die hier folgende Beschreibung der Ergebnisse auf einschlägige Reviews von Publikationen international anerkannter, überwiegend epidemiologischer Studien (EPI-Studien) stützen.

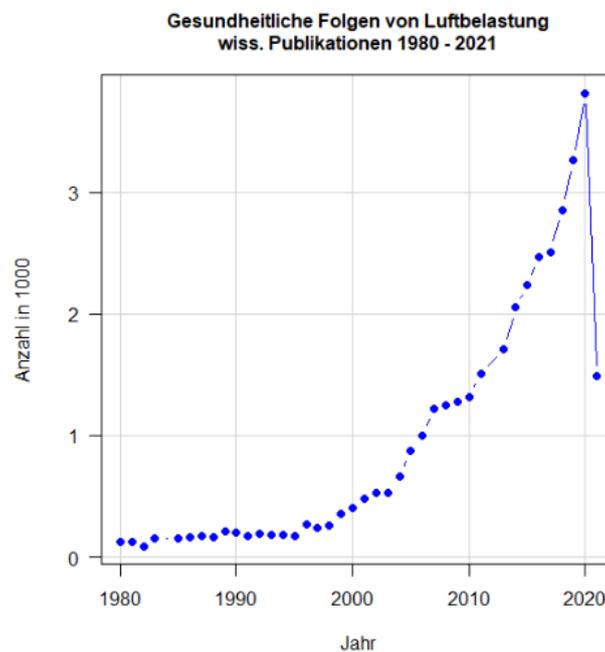


Abbildung 1: Wiss. Publikationen zu „Feinstaub in der Atemluft“ 1980-2020

Die Corona Pandemie hat offenbar die wissenschaftlichen Ressourcen von der Problematik der Luftbelastung in Richtung Covid-19 gelenkt, wenngleich die gesundheitlichen Folgen der Luftbelastungen vielfältiger und größer sind.

Epidemiologische Studien stellen die bisher am häufigsten genutzte Möglichkeit dar, Zusammenhänge von Luftbelastungen und menschlicher Gesundheit zu erforschen. Zellexperimente, Tierversuche und Versuche mit kurzzeitiger Belastung von Versuchspersonen bilden quantitativ eine kleine Gruppe, deren Ziel es ist, die epidemiologisch nicht abgebildeten Mechanismen der Folgen von Luftbelastungen zu ermitteln.

⁵ Meta-Datenbank medizinischer Publikationen: US National Library of Medicine National Institutes of Health

Gesundheitliche Folgen von Langzeitexpositionen in belasteter Luft sind seit geraumer Zeit gut dokumentiert⁶. Allerdings erreichten einige der Studien mit zu kleinem Stichprobenumfang nur eine zu geringe Power, um die Wirkungen von Luftbelastungen auf die menschliche Gesundheit signifikant zu belegen.

Die unterschiedliche Akzeptanz der Ergebnisse epidemiologischer Studien wird auch durch die Problematik der Bestimmung des 'attributable risk' von Luftbelastungen hinsichtlich gesundheitlicher Wirkungen beeinflusst. Hierin liegt zweifellos das größte empirisch-organisatorische Problem von EPI-Studien.

EPI-Studien bzgl. gesundheitlicher Wirkungen durch Luftbelastungen basieren formal auf folgendem Modell:

- (1) Auswahl von Regionen mit deutlich verschiedenen Luftbelastungen
- (2) Ermittlung regionaler Verteilungen von Kovariaten wie Rauchen, BMI, Alter, Wohnort, Bildung, sozialer Status, Vorerkrankungen etc., die als mögliche Einflussgrößen in Betracht kommen.
- (3) Datenanalysen und statistische Modellierung zur Abschätzung des 'attributable risk' bezüglich gesundheitlicher Wirkungen, die allein/ primär auf Feinstaub in der Atemluft zurückzuführen sind.

Kritische bzw. ablehnende Haltungen zu einschlägigen Ergebnissen von EPI-Studien werden oft damit begründet, dass nicht alle möglichen Kovariaten berücksichtigt wurden. Dieses ‚Argument‘ kann jederzeit und ohne Beleg angeführt, aber i.d.R. nach abgeschlossener Datenerfassung und Analyse ad hoc nicht widerlegt werden. Auf diese Weise werden die Forschungsergebnisse leicht zum Spielball öffentlicher Debatten.

Im Hinblick auf gesundheitliche Folgen von Luftbelastungen stehen Morbiditäts- bzw. Mortalitätsraten beispielsweise bzgl. Lungenkrankheiten und Herz-Kreislaufkrankungen als Zielgrößen im Vordergrund. Mögliche Wirkungen anderer Einflussgrößen neben der Luftbelastung müssen und können bei hinreichend großen Stichproben statistisch eliminiert, d.h. kontrolliert werden. Der Grad ihrer Vollständigkeit⁷ dient als Maß für die

⁶ Ambient (outdoor) air quality and health. Fact sheet no. 313. Updated March 2014. Geneva: World Health Organization, 2015.

⁷entsprechend "Stand der Wissenschaft"

Sicherung der quasi-kausalen⁸ Begründung von Luftbelastung als Ursache für gesundheitliche Folgen.

In der Tat führen unvollständige Erfassungen der unter (2) und (3) genannten Phasen epidemiologischer Studien zum ‚bias of omitted variables‘ und damit zu einer Minderung der Reliabilität und öffentlichen Akzeptanz der Ergebnisse.

Im Bereich der nicht-epidemiologischen Grundlagenforschung zu gesundheitlichen Wirkungen durch Feinstaub in der Atemluft ist offenbar dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT)⁹ eine erfolgversprechende Entwicklung gelungen. Ein neues Expositionssystem, das Humanzellen feinstaubbelasteten Luftströmen ausgesetzt und deren allein durch Feinstaub erzeugten Schädigungen exakt und reproduzierbar misst. Hiermit lassen sich ohne Tierversuche relativ einfach Messdaten über die Schadwirkung von Feinstäuben verschiedenster Quellen und Größen an Humanzellen gewinnen.

Hinsichtlich des Grads ihrer Aggregation stellen diese Laboruntersuchungen an Humanzellen und EPI-Studien zwei Extreme möglicher Forschungsansätze dar. Während EPI-Studien mit ihren Folgerungen nur mit großem Aufwand und abhängig von den regionalen Gegebenheiten und Datenlagen nur in die Nähe der gesuchten Kausalität gelangen, benötigt das Expositionssystem des KIT neben der randomisiert-experimentell bestimmten Ursache ein Modell zur Aggregation und Übertragung der auf einzelne Zellen bezogenen Informationen auf den gesamten Organismus.

4.1 Datenlage zur Gesundheitsbelastung durch Feinstaub

Die folgende Skizzierung und Bewertung von Forschungen über gesundheitliche Folgen von Luftbelastungen stützt sich auf die offiziellen Einschätzungen durch die WHO und die US-EPA, deren wichtigsten regelmäßigen Publikationen unten kurz vorgestellt werden. Sie beurteilen zwar überwiegend die selbst initiierten bzw. finanzierten Forschungen, aber der wissenschaftliche Rang renommierter Forschungseinrichtungen verleiht den Ergebnissen ein hohes Maß an Objektivität und Sorgfalt. Die in der folgenden Tabelle vorgenommene Zusammenstellung gibt einen Eindruck zum Forschungsstand bzgl. der Gesundheitsgefahr durch Feinstaub. Die Kriterien der Bewertungen sind

⁸ die Interpretation einer Korrelation als "kausal" oder "quasi-kausal" ist nur unter Bezugnahme auf den Stand der Forschung zu legitimieren.

⁹ Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Zielgrößen/ Outcomes, Dauer der Exposition, Art der stofflichen Belastung und Qualität der Datenlage. Für die Bewertungen selbst verwenden die o.g. Organisationen die unter der folgenden Tabelle angegebene Legende.

Morbidität/ Mortalität		Kurzzeit-Exposition				Langzeit-Exposition			
		PM2,5	PM10-2.5	UFP	NO ₂	PM2,5	PM10-2.5	UFP	NO ₂
Herz-Kreislauf	US-EPA	4	3/2	3	-	4	3	1	2
	WHO/ EU	4	3	3	-	4	3	3	3
Mortalität	US-EPA	4	3	1	1	4	2	0	2
	WHO/EU	4	3	-	1	4	3	-	2
Tumor	US-EPA	-	-	-	-	4	1	0	
	WHO/EU	-	-	-	-	-	-	-	-
Nerven	US-EPA	2	1	2	-	3	2	1	
	WHO/EU	2	2	2	2				
Atmung	US-EPA	4	2	3	4	3	1	1	3
	WHO/EU	4	2	2	4	4	2	-	4
Metabolisch	US-EPA	3	3	1	-	2	2	1	
	WHO/EU								
Geburt	US-EPA	3	1	1	-	2	1	1	
	WHO/EU								

4 kausal - 3 vermutlich kausal - 2 kausal möglich - 1 Datenlage unzureichend

Tabelle 2: Bewertungen von Studien zur Luftbelastung und Gesundheit durch WHO & EPA

Als Ergebnis seiner Bewertung stellt Wichmann fest:

„Die Bewertung des Wissensstands zu Gesundheitsrisiken durch internationale Expertengremien ergibt für die Kurzzeit- und Langzeitexposition gegenüber Feinstaub (insbesondere PM_{2,5}) erhebliche Gesundheitsrisiken für Atemwegs- und Herz-Kreislauf Erkrankungen sowie für die Mortalität. Die Datenlage gestattet es, gut begründete Abschätzungen von vorzeitigen Todesfällen oder verlorenen Lebensjahren durch die Exposition gegenüber PM_{2,5} vorzunehmen, wie diese von mehreren Institutionen (WHO, US-EPA, EU-Kommission, OECD, Global Burden of Disease) durchgeführt werden.“¹⁰

¹⁰ Ebd. S. 19

Grundlage der in Tabelle 2 dargestellten Bewertungen sind die folgenden regelmäßig aktualisierten, internationalen Reviews.

- WHO 2013: REVIHAAP Evaluation of Health aspects of air pollution
Das WHO-Projekt REVIHAAP wurde in den Jahren 2012-13 durchgeführt und bewertete die seit 2005 neu gesammelten internationalen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die gesundheitlichen Aspekte der Luftverschmutzung. Die Ergebnisse stützen die WHO-Luftqualitätsrichtlinien von 2005, zeigen aber bereits, dass negative Auswirkungen auf die Gesundheit teilweise auch deutlich unter den empfohlenen WHO Grenzwerten von 2005 auftreten.
- WHO 2013: HRAPIE Concentration-Response Functions
Aufbauend auf den Ergebnissen des o.g. REVIHAAP Projekts stellt HRAPIE Konzentrations-Wirkungs-Funktionen für die Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen u.a. von Feinstaub bereit.
- WHO 2016: Available evidence for update of the guidelines
Zur Vorbereitung des Updates der Air Quality Guidelines¹¹ der WHO in 2021 wurden Expertenmeinungen zu den neuesten verfügbaren Erkenntnissen über die gesundheitlichen Auswirkungen verschiedener Luftschadstoffe und über Maßnahmen zur Verringerung der Luftverschmutzung zusammen getragen.
- US-EPA 2009: Integrated Science Assessment
US-EPA 2010: Quantitative Health Risk Assessment
US-EPA 2016a Review Plan for Air Quality Standards
Die amerikanische Environment Protection Agency (EPA) hat für die Luftbelastung durch Feinstaub nationale Luftqualitätsstandards (NAAQS) festgelegt, die entsprechend des Clean Air Acts im Rahmen der Wissenschaftliche Gesamtbeurteilung¹² jährlich überprüft werden sollen.
Die o.g. Berichte sind Auswertungen der wissenschaftlichen Literatur über die potenziellen Auswirkungen der Exposition durch Feinstaub auf die menschliche Gesundheit. Die Entwicklung dieser Dokumente ist Teil der regelmäßigen Überprüfung der nationalen Luftqualitätsstandards der USA¹³.

¹¹ Die WHO-Luftgüteleitlinien (AQGs) werden als Referenzinstrument publiziert, um internationale Entscheidungsträger bei der Festlegung von Standards und Zielen für Luftqualität zu unterstützen.

¹² Integrated Science Assessment (ISA)

¹³ National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)

Weitere einschlägige Konsortien und Studien, die in der Aufstellung Wichmanns keine Berücksichtigung fanden, aber durch ihren Umfang von Bedeutung sind, sind das Konsortium ‚Global Burden of Disease‘ und der Bericht ‚Air Quality in Europe‘ der Europäischen Umweltagentur, die im folgenden kurz dargestellt werden.

4.1.1 Konsortium: ‚Global Burden of Disease‘ und ‚State of Global Air‘¹⁴

In den USA wurde bereits in den frühen 1990-er Jahren das sogenannte Global Burden of Disease (GBD) Konsortium von der WHO und der Weltbank in Kooperation mit der Harvard School of Public Health initiiert. Heute wird die ‚Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors Study‘ vom Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) an der University of Washington geleitet und ist die größte und detaillierteste wissenschaftliche Einzelstudie, die jemals zur Quantifizierung von weltweiten Gesundheitsniveaus und -trends durchgeführt wurde. Mit mehr als 3.600 Forschern in mehr als 145 Ländern stellt sie den internationalen Standard zur Quantifizierung von Gesundheitsverlusten durch Hunderte von Krankheiten, Verletzungen und Risikofaktoren. Die Datenvisualisierung, die in diesem Rahmen unter healthdata.org verfügbar ist, sucht ihresgleichen.

Im Bereich Luftverschmutzung gibt der Bericht ‚State of Global Air‘ einen jährlichen Überblick über die neuesten Informationen bzgl. Luftqualität und Gesundheit für Länder rund um den Globus.

Hierin wird geschätzt, dass die Luftverschmutzung der Außenluft durch PM_{2,5} im Jahr 2019 global zu etwa 4,14 Millionen Todesfällen und 118 Millionen verlorenen gesunden Lebensjahren beigetragen hat, was was 62 % aller auf Luftverschmutzung zurückzuführenden Todesfälle bzw. 55 % der DALYs entspricht. Luftverschmutzung durch PM_{2,5} steht an sechster Stelle der globalen Sterblichkeitsrisiken und wird nur von schlechter Ernährung, hohem Blutdruck, Tabakkonsum und hohem Blutzucker übertroffen. Unter den Umweltrisiken besetzt Luftverschmutzung durch PM_{2,5} die Spitzenposition, während die Gesundheitsgefahr durch die früheren Spitzenreiter Wasserbelastung und mangelhafte sanitäre Einrichtungen inzwischen als weitaus geringer eingestuft wird¹⁵.

In Deutschland liegt die Krankheitslast durch Luftverschmutzung an zehnter Stelle aller Risikofaktoren und ist damit der wichtigste umweltbezogene Risikofaktor.

¹⁴ HEALTH EFFECTS INSTITUTE 2020. *State of Global Air 2020: Special Report*, Boston, Health Effects Institute.

¹⁵ Gesamter Absatz vgl. ebd. S. 17.

4.1.2 Bericht zu Luftqualität in Europa der Europäischen Umweltagentur

Der Bericht „Air quality in Europe“, der jährlich von der Europäischen Umweltagentur (EUA, auch EEA) herausgegeben wird, enthält neben der Analyse der Luftqualität in Europa auch eine jeweils aktuelle Einschätzung ihrer Gesundheitsfolgen.

Der Bericht beschreibt jährlich, in welchem Ausmaß die europäische Bevölkerung dem Feinstaub ausgesetzt ist. Die Exposition wird auf der Grundlage gemessener Konzentrationen an allen städtischen und vorstädtischen Hintergrundüberwachungsstationen für den größten Teil der städtischen Bevölkerung und an Verkehrsstationen für die Bevölkerung, die im Umkreis von 100 m um Hauptverkehrsstraßen lebt, geschätzt.

Demnach war etwa 17% der Stadtbevölkerung der EU-28 in 2017 PM₁₀ Belastungen ausgesetzt, die über dem EU-Tagesgrenzwert lagen. Werten oberhalb der strengeren Tagesempfehlung der WHO (vor 2021) waren 44% der Stadtbevölkerung ausgesetzt. Bezüglich des Jahresgrenzwerts der WHO betrafen die Überschreitungen im Zeitraum 2000-2017 sogar zwischen 42-91% der Bevölkerung.

4.1.3 Harvard University: Air Pollution and Mortality in the Medicare Population¹⁶

Eine wichtige Ergänzung der oben genannten Forschungsergebnisse bei gleichzeitig hoher Reliabilität durch entsprechende Fallzahlen stellt die 2017 erschienene Arbeit „Air Pollution and Mortality in the Medicare Population“ dar.

Anders als die meisten anderen Studien belegt sie auch bei wesentlich niedrigeren Werten unterhalb der aktuellen nationalen Luftqualitätsstandards eine signifikante Erhöhung der Sterblichkeit bei Anstieg der Luftbelastung mit PM_{2,5} und Ozon.

Auf Basis von über 60 Millionen Personendaten mit 460 Millionen-Personenjahren von Bewohnern der USA fassen die Autoren das Ergebnis wie folgt zusammen:

Increases of 10 µg per cubic meter in PM_{2,5} and of 10 ppb in ozone were associated with increases in all-cause mortality of 7.3%, (95%-CI, 7.1 to 7.5) and 1.1% (95%-CI, 1.0 to 1.2), respectively

When the analysis was restricted to person-years with exposure to PM_{2,5} of less than 12 µg per cubic meter and ozone of less than 50 ppb, the same increases in PM_{2,5} and ozone were associated with increases in the risk of death of 13.6% (95%-CI, 13.1 to 14.1) and 1.0% (95%-CI, 0.9 to 1.1), respectively.

For PM_{2,5}, the risk of death among men, blacks, and people with Medicaid eligibility was higher than that in the rest of the population.

In the entire Medicare population, there was significant evidence of adverse effects related to exposure to PM_{2,5} and ozone at concentrations below current national standards. This effect was most pronounced among self-identified racial minorities and people with low income¹⁷.

Die Studie belegt außerdem im unteren Belastungsbereich bei PM_{2,5} < 12 µg/m³ bei gleichem Anstieg der Belastung eine höhere Zunahme des Mortalitätsrisikos als im Bereich insgesamt höherer Werte.

¹⁶ Di, Qian, WANG, Yan, ZANOBETTI, Antonella, WANG, Yun, KOUTRAKIS, Petros, CHOIRAT, Christine, DOMINICI, Francesca & SCHWARTZ, Joel D 2017. *Air pollution and mortality in the Medicare population*. New England Journal of Medicine, 376, 2513-2522.

¹⁷ Ebd.

Variable	Fallzahl	Ozon		PM2,5	
		≥ 50 ppb	< 50 ppb	≥ 12 µg/m ³	< 12 µg/m ³
Population					
Anzahl Personen	60.925.443	14.405.094	46.520.349	28.145.493	32.779.950
Anzahl Todesfälle	22.567.924	5.097.796	17.470.128	10.659.036	11.908.888
Personenlebensjahre gesamt	460.310.521	106.478.685	353.831.836	212.628.154	247.682.367
Median (Jahr) Follow-Up	7	7	7	7	7
Ozon (ppb)	46,3	52,8	44,4	58,0	45,3
PM2,5 (µg/m ³)	11,0	10,9	11,0	13,3	9,6
Einzelne Kovariablen					
Männlich (%)	44,0	44,3	43,8	43,1	44,7
Ethnische Zugehörigkeit					
Weiß	85,4	86,6	85,1	82,0	88,4
Schwarz	8,7	7,2	9,2	12,2	5,9
Asiatisch	1,8	1,8	1,8	2,1	1,6
Hispanisch	1,9	2,0	1,9	1,9	1,9
Ureinwohner Amerikas	0,3	0,6	0,3	0,1	0,6
Medicaid (%)	16,5	15,3	16,8	17,8	15,3
Alter Studienbeginn	70,1	69,7	70,2	70,1	70,0
Ökologische Variablen					
BMI	28,2	27,9	28,4	28,0	28,4
Raucher/ ehemalige Raucher	46,0	44,9	46,2	45,8	46,0
Alter > 65 Jahre					
Hispanisch	9,5	13,4	8,4	8,4	10,0
Schwarz	8,8	7,2	9,3	13,3	6,3
Einkommen (in 1000 \$)	47,4	51,0	46,4	47,3	47,4
Grundstück (in 1000 \$)	160,5	175,8	156,3	161,7	159,8
Unter Armutsgrenze (%)	12,2	11,4	12,4	12,5	12,0
Kein Highschool Abschluss (%)	32,3	30,7	32,7	35,3	30,6
Wohneigentum (%)	71,5	71,3	71,6	68,6	73,2
Personen/ km ²	3,2	0,7	3,8	4,8	2,2
>=1 Krankenhausaufenthalt (%)	91,7	92,2	91,6	91,7	91,7
Meteorologische Variablen					
Durchschnittstemperatur (°C)	14,0	14,9	13,8	14,5	13,7
Relative Luftfeuchtigkeit (%)	71,1	60,8	73,9	73,7	69,6

Tabelle 3: Air Pollution and Mortality in the Medicare Population, ökologische und meteorologische Merkmale

4.1.4 Review: Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem¹⁸

In diesem sehr aktuellen Review von 2021 bezieht sich die Risikoabschätzung zu PM_{2,5} - im Gegensatz zu den oben angesprochenen Veröffentlichungen der Global Burden of Disease (GBD) - primär auf Stäube aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (mit größtem Anteil Diesel, Benzin und Kohle), denen 10,2 Mio bzw. 8,7 Mio vorzeitige, globale Todesfälle im Jahr 2012 bzw. 2018 zugeschrieben werden.

Außerdem werden hier auf Grundlage des Modells GEOS-Chem zum Transport chemischer Substanzen Schätzungen für die Wirkung besonders hoher (über 40 µg·m⁻³) bzw. niedriger (unter 10 µg·m⁻³) Feinstaubkonzentrationen vorgenommen. Dabei tritt analog zur Studie der Medicare Population und als fundamentaler Unterschied zu bisherigen Betrachtungen die Nichtlinearität der Konzentrationswirkung zu Tage: Die Konzentrations-Wirkungsfunktion steigt bei niedrigeren Konzentrationen steiler an und führt bei der Einschätzung für Europa und Nordamerika zu höheren Wirkungswerten als bisher festgestellt, während der langsamere Abfall der Steigung bei höheren Konzentrationen zu dramatischeren Schätzwerten für den asiatischen Raum führt. Die vom UBA dargestellten, leicht sinkenden Werte für Deutschland nehmen dem Thema seine Brisanz also keinesfalls.

Vor diesem Hintergrund formulieren die Autoren des Reviews vielmehr als...

„...klare Botschaft an politische Entscheidungsträger und Interessenvertreter, (...) weitere Anreize für einen Wechsel zu sauberen Energiequellen zu schaffen“ (ebd., S.2)

¹⁸ VOHRA, Karn, VODONOS, Alina, SCHWARTZ, Joel, MARAIS, Eloise A, SULPRIZIO, Melissa P & MICKLEY, Loretta J 2021. *Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem*. Environmental Research, 195, 110754.

4.2 Corona – Lockdown Spaniens 2020

Der im Frühjahr 2020 auch in Spanien wegen der Corona-Pandemie durchgesetzte Lockdown stellt eine ausgezeichnete Möglichkeit zur Erforschung und Demonstration der Wirkung von Luftbelastungen auf die menschliche Gesundheit dar. Am Beispiel der 17 Regionen Spaniens zeigt sich bei Klinikeinweisungen wegen Herzinfarkt vor und während der ersten Welle der Corona-Epidemie folgendes Bild¹⁹:

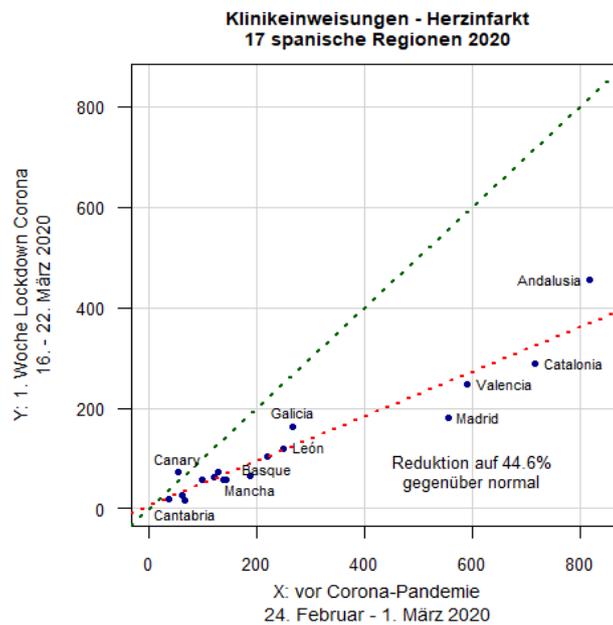


Abbildung 2: Klinikeinweisungen wegen Herzinfarkt, vor und nach Lockdown, alle Behandlungen

Im Normalfall, d.h. ohne Corona-Lockdown, würden die Punkte (Regionen) beim Vergleich zweier aufeinander folgender Wochen – im Gegensatz zu Abbildung 2 – etwas um die Winkelhalbierende (Steigung = 1) streuen.

Für die Relation der Anzahlen beider Wochen ergibt sich aber

$$Y = 4.9 + 0.446 \cdot X \text{ mit } R^2 = 0.91$$

Das heißt, Klinikeinweisungen wegen Herzinfarkt reduzierten sich bereits in der ersten Woche des Lockdowns in allen 17 Regionen nahezu identisch auf etwa 44.6% gegenüber der letzten Woche vor dem Lockdown. Diese Beobachtung deckt sich mit den

¹⁹ RODRÍGUEZ-LEOR, Oriol, CID-ÁLVAREZ, Belén, OJEDA, Soledad, MARTÍN-MOREIRAS, Javier, RUMOROSO, José Ramón, LÓPEZ-PALOP, Ramón, SERRADOR, Ana, CEQUIER, Ángel, ROMAGUERA, Rafael, CRUZ, Ignacio, PRADO, Armando Pérez de & MORENO, Raúl 2019. *Impact of the COVID-19 pandemic on interventional cardiology activity in Spain*, Madrid, Permanyer Publications.

weltweit dokumentierten Reduktionen von Klinikeinweisungen und kann daher als exemplarisch für diesen Effekt gesehen werden. Beispielsweise weist die Auswertung der Krankenhauseinweisungen von 27 Millionen AOK-Versicherten in Deutschland auf „überraschend starke Rückgänge bei der Behandlung von Herzinfarkten (-31%) und Schlaganfällen (-18%)“²⁰ hin.

Zur Erklärung dieses Phänomens wurde von Seiten der Kliniken spontan ‚Angst vor Ansteckung mit Covid-19‘ geäußert, die angeblich dazu geführt hatte, dass Klinikbesuche unterblieben. Auch regulatorische Vorgaben der Politik haben sicherlich eine Rolle gespielt. Allerdings können Ängste und Regularien nur die Begründung für einen Teil der reduzierten Klinikeinweisungen sein wie im Folgenden gezeigt wird.

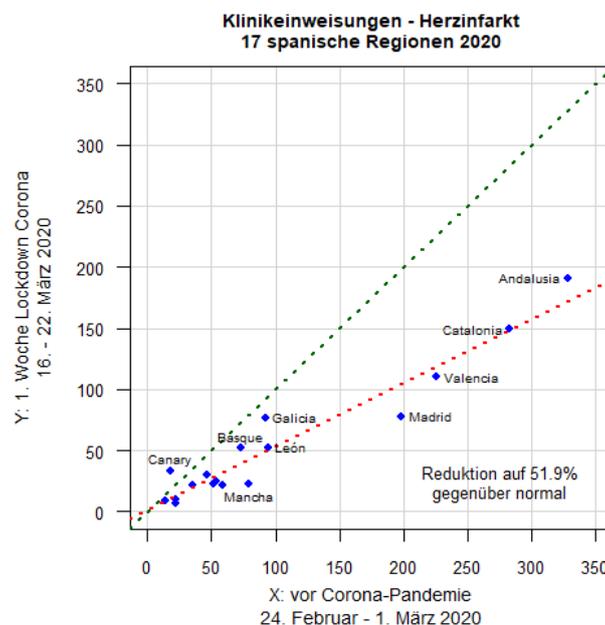


Abbildung 3: Behandlung von Herzinfarkten mit Ballondilatation und STEMI²¹

²⁰ GÜNSTER, Christian, DROGAN, Dagmar, HENTSCHKER, Corinna, KLAUBER, Jürgen, MALZAHN, Jürgen, SCHILLINGER, Gerhard & MOSTERT, Carina 2020. *WIdO-Report: Entwicklung der Krankenhaushallzahlen während des Coronavirus-Lockdowns. Nach ICD-Diagnosekapiteln und ausgewählten Behandlungsanlässen*, Berlin, Wissenschaftliches Institut der AOK (WIdO).

²¹ RODRÍGUEZ-LEOR, Oriol, CID-ÁLVAREZ, Belén, OJEDA, Soledad, MARTÍN-MOREIRAS, Javier, RUMOROSO, José Ramón, LÓPEZ-PALOP, Ramón, SERRADOR, Ana, CEQUIER, Ángel, ROMAGUERA, Rafael, CRUZ, Ignacio, PRADO, Armando Pérez de & MORENO, Raúl 2019. *Impact of the COVID-19 pandemic on interventional cardiology activity in Spain*, Madrid, Permanyer Publications.

Die spanische Statistik unterscheidet vier Kategorien von Klinikeinweisungen wegen Herzinfarkt. Bei den Diagnosen STEMI²² und bei Fällen, die eine Ballondilatation erfordern, besteht unmittelbar Lebensgefahr, für die ‚Angst vor Ansteckung‘ keine signifikante Rolle spielt.

Nach Eliminierung der nicht unmittelbar lebensbedrohlichen Fälle ergibt sich die Relation

$$Y = 1.9 + 0.519 \cdot X \text{ mit } R^2 = 0.93,$$

was einer statistisch gesicherten Reduktion der Zahl der Klinikeinweisungen aller Regionen auf etwa 51.9% gegenüber den sonst üblichen Werten entspricht.

Dieser Befund erlaubt keine unmittelbar quantitativ-kausale Interpretation, da durch den Lockdown neben Luftbelastungen durch Feinstaub, Stickoxide etc. auch eine Reihe anderer, z.T. gänzlich unbekannter Parameter geändert wurden (z.B. Belastung durch Stress etc.). Dies verhindert das sonst übliche statistische ‚controlling for‘ zur Reduktion auf die Wirkungen eines ‚attributable risks‘, die allein auf den Lockdown zurückzuführen wären.

Eine qualitative Absicherung der o.g. Interpretation ist allerdings durch die Ergebnisse der außerordentlichen Studie "Short-term effect of PM_{2,5} on daily hospital admissions in Madrid (2003–2005)" der Epidemiologen Linares & Diaz²³ möglich.

²² ST-Elevation Myocardial Infarction, ein Herzinfarkt, der eine Hebung der ST-Strecke ein lebensbedrohliches Risiko darstellt

²³ LINARES, Cristina & DIAZ, Julio 2010. *Short-term effect of PM_{2.5} on daily hospital admissions in Madrid (2003–2005)*. International journal of environmental health research, 20, 129-140.

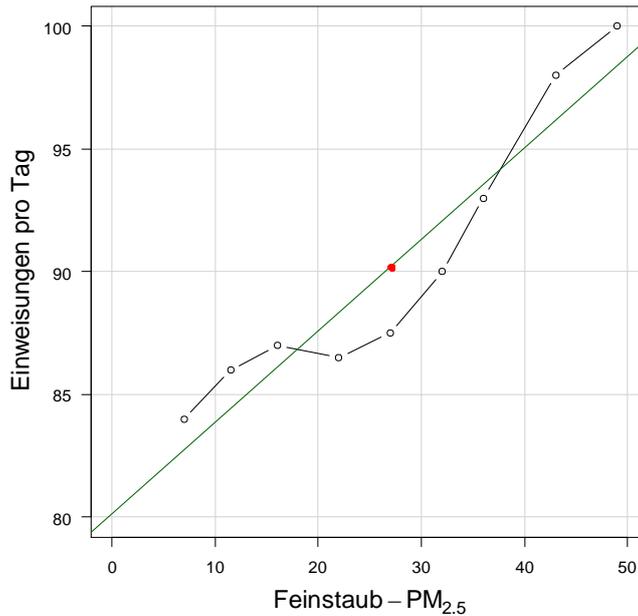


Abbildung 4: Anzahl Klinikeinweisungen vs. Feinstaub, Madrid 2003-2005, time-lag=0²⁴

Ihre Arbeit basiert auf Daten zweier Zeitreihen bezüglich Luftbelastung und Krankenhauseinweisungen, womit der zeitliche Zusammenhang von Ursache und Wirkung ermittelt werden kann. Außerdem beziehen sich alle Beobachtungen auf dieselbe Bevölkerung Madrids, was eine Kontrolle aller sonstigen Ortsvariablen erübrigt. Linares & Diaz konnten zeigen, dass die Anzahl aller Einweisungen in die zentrale Klinik Madrids mit steigender Luftbelastung durch Feinstaub der Fraktion PM_{2,5} hochsignifikant ansteigt und dass diese Reaktion instantan, d.h. mit dem time-lag=0 erfolgt.

Der Nachweis der instantanen Reaktion zeigt deutlich, dass die herkömmliche Ansicht, wonach Luftbelastungen nur kumulativ, d.h. über längere Zeiträume wirksam sind, nicht zutrifft.

Eine Grenzwertsetzung für das Jahresmittel von PM_{2,5} erscheint hinsichtlich der genannten Absicht ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ als völlig ungeeignet und hinsichtlich des erforderlichen Schutzes fahrlässig.

Die Autoren der Madrider Studie verfügten über 1095 Tageswerte mit 94.979 Einweisungen in die zentrale Universitätsklinik von Madrid in den Jahren 2003 bis 2005 und parallel dazu über die Zeitreihen der Tagesmittelwerte von PM_{2,5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, NO_x, O₃, Pollenflug, akustischen Belastungen, saisonbedingten Grippefällen sowie über

²⁴ Grafik auf Datenbasis von ebd.

Daten zu besonderen Wetterlagen. Der dokumentierte, signifikante Anstieg um 4 Klinikeinweisungen bei Zunahme von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Feinstaub $\text{PM}_{2,5}$ stellt offensichtlich eine deutliche Unterschätzung des Gradienten bezüglich Herzinfarkten dar, zumal die Studie mit Ausnahme von Entbindungen und Unfällen alle planbaren Einweisungen in die Berechnungen einbezog und die bezüglich Luftbelastungen affinen Herz-Kreislauf-Erkrankungen lediglich 15% davon ausmachten.

5 Die 39. BImSchV, Kritik und offene Fragen

5.1 Vorsorge und Schutz

Gesetzgebungen zur Luftqualität gehen bereits auf frühe Erfahrungen mit siedlungsnahen Verbrennungsprozessen zurück und erfuhren mit zunehmender Industrialisierung an politischer Bedeutung.

Verschiedene Smog-Katastrophen²⁵ des 20. Jahrhunderts führten in den Industrieländern führten u.a. in Deutschland zur Änderung der Gewerbeordnung und 1964 zur "Ersten Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft", die bis heute vor allem der Genehmigung von industriellen Anlagen dient und Vorgaben zur Begrenzung von Anlagenemissionen sowie weitere technische und verfahrensmäßige Bestimmungen enthält. Bei der Konkretisierung und Ausübung des Rechts nach §48 BImSchG spielt die TA-Luft als Verwaltungsvorschrift für Industrie und Gewerbe auch heute noch eine entscheidende Rolle.

Das deutsche BImSchG selbst besteht seit 1974²⁶ und enthält in der heutigen Fassung in §48 b die Regelung zum Erlass von Rechtsverordnungen zur Erfüllung von bindenden Rechtsakten der Europäischen Union. Die 39. BImSchV, eine von 44 dieser Verordnungen, dient der Umsetzung der EU-Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa²⁷ in deutsches Recht und entsprechend der Festlegung und Regelung von Luftqualitätsstandards²⁸ in Deutschland.

Die 39. BImSchV legt für Deutschland - analog zur europaweiten Regelung - unter anderem die Grenzwerte für zulässige Immissionen bzgl. Feinstaub in der Außenluft fest (Tabelle 1).

Die durch sie initiierte Betonung der Immission in der Luftreinhaltungspolitik spielte in der deutschen Praxis bzw. der öffentlichen Wahrnehmung zunächst nur eine untergeordnete Rolle. In Anlehnung an die Verwaltungsvorschrift TA Luft standen Emissionsminderungen durch technische Änderungen²⁹ als vermeintliche Garanten für die Einhaltung der o.g. Immissionsgrenzwerte im Vordergrund. Die Immissionsgrenzwerte waren im Wesentlichen lediglich in der TA Luft normiert und nur mit Blick auf die Genehmigung

²⁵ z.B. 1930 Maastal bei Lüttich; 1948 Pennsylvania (USA); 1952 und 1956 London; 1962 Ruhrgebiet

²⁶ Zu diesem Zeitpunkt wurde die TA-Luft ins BImSchG eingegliedert.

²⁷ auch EU-Luftqualitätsrichtlinie, Ambient Air Quality Directive (AAQD)

²⁸ "Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen", geändert mit der 43. BImSchV.

²⁹ sogenannte Abgasnormen

bzw. die Sanierung genehmigungsbedürftiger Anlagen³⁰ unmittelbar anwendbar - Adressat des klassischen Immissionsschutzrechts war also der Anlagenbetreiber.

Erst nach Beanstandungen des EuGH wurden die europäischen Immissionsgrenzwerte im September 2002 in Deutschland nicht mehr nur in Verwaltungsvorschriften, sondern in nationalen Gesetzen bzw. Verordnungen verankert. Mit Inkrafttreten der 22. BImSchV erhielten die Grenzwerte in Deutschland Gesetzesrang, wodurch eine bundesweite Allgemeinverbindlichkeit und Transparenz über das Schutzniveau hergestellt wurde.

Die BImSchV verlangt, dass Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen getroffen wird, insbesondere durch die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung. Dadurch soll der gebotene Immissionsschutz vorverlagert, nämlich über den traditionellen Schutzgrundsatz hinaus ausgedehnt werden. Dabei muss die Vorsorge im Sinne einer gefahrenunabhängigen Risikovorsorge verstanden werden.

Bezüglich Feinstaub ergeben sich rechtlich u.a. folgende Fragen und Feststellungen:

- Welche Wirkungen zeigen Grenzwerte der 39.BImSchV im Sinne des Schutz- und Vorsorgeprinzips und wie werden sie überprüft?
- Im Gegensatz zum Schutzprinzip stehen bei der Vorsorge nicht die Immissionen, sondern die Emissionen der Anlagen, also die von ihnen ausgehenden Umweltbelastungen in der Verantwortung, und zwar unabhängig davon, wie sie sich im Einzelfall auf Dritte auswirken³¹.
- Eine Risikovorsorge kommt nach Breuer³² bereits unterhalb der Schädlichkeitsschwelle, also unterhalb des Vorhandenseins einer konkreten Gefahr in Betracht. Die Vorsorgeverpflichtung des Staates greift also auch, wenn bestimmte Emissionen (und mittelbar auch Immissionen) nach Auswertung aller naturwissenschaftlichen Erkenntnisse als unschädlich angesehen werden müssen, jedoch, zumindest nach einer Mindermeinung in der wissenschaftlichen Fachwelt, eine gewisse Unsicherheit verbleibt. Es handelt sich hierbei um einen Gefahrenverdacht, dessen Gültigkeit nicht vom Nachweis einer Kausalität abhängt.

30 KÖCK, Wolfgang & LEHMANN, Katharina 2013. *Die Entwicklung des Luftqualitätsrechts*. ZUR – Zeitschrift für Umweltrecht, 47-64.

³¹ HUBER, Peter M. 1989. *Der Immissionsschutz im Brennpunkt modernen Verwaltungsrechts: Fünfzehn Jahre Bundes-Immissionsschutzgesetz*. Archiv des öffentlichen Rechts, 114, 252-307.

³² BREUER, R. 1988. Umweltschutzrecht. In: MÜNCH, I. V., BADURA, P., FRIAUF, K. H. & OPPERMAN, T. (eds.) *Besonderes Verwaltungsrecht*. Berlin: de Gruyter.

- Sind die Grenzwerte überall und zu jeder Zeit einzuhalten oder können nur Durchschnittswerte eines Gebiets Rechtsfolgen nach sich ziehen?
- Welche Rechtsfolgen ergeben sich aus der Verletzung der Grenzwerte?

Einige der hiermit zusammenhängenden Fragen hat das BVerwG bereits 2004, d.h. bei Gültigkeit der 22.BImSchV entschieden³³:

- Einhaltung der Grenzwerte dienen dem Schutz der menschlichen Gesundheit und können vor allem von Personen beansprucht werden, die sich länger in der betreffenden Region aufhalten.
- Grenzwerte bzgl. Immissionen sind nicht nur regional sondern auch grundstücksbezogen einzuhalten.
- Vorschriften haben keine unmittelbare Bedeutung für Planfeststellungen von Fernstraßen, Anlagen etc. sofern durch entsprechende Luftreinhalteplanungen die zu erwartende Überschreitung der Grenzwerte auf das vorgeschriebene Niveau zurückgeführt werden kann.

Für den Fall, dass nicht alle Emissionsgrenzwerte einer geplanten Anlage einzuhalten sind, besteht durch das Umwelt-Rechtsbereinigungsgesetz vom 11.8.2009 dennoch ein Anspruch auf Genehmigung, sofern die geplante Anlage nach §6, Absatz 3 BImSchG als in besonderer Weise umweltfreundlich eingestuft werden kann.

Nach höchstrichterlicher Rechtsprechung³⁴ werden Luftreinhaltepläne allerdings lediglich als Verwaltungsvorschriften eingestuft mit der Folge, dass von ihnen keine unmittelbare Wirkung auf die tatsächlichen Immissionen ausgeht.

³³ ohne Änderung auch heute für die Tochterrichtlinie 39. BImSchV gültig

³⁴ BUNDESVERWALTUNGSGERICHT 2007. *Beschluss vom 29.03.2007 - BVerwG 7 C 9.06*, Leipzig, Bundesverwaltungsgericht,.

5.2 Luftqualitätsstandards in deutschem Recht

Die Notwendigkeit systematischer Untersuchungen bezüglich gesundheitlicher Folgen von Staubbelastungen in der Atemluft ergab sich insbesondere durch die bereits vor über 100 Jahren weltweit beobachtete, verkürzte Lebenserwartung der Arbeiter im Kohlebergbau. So weit überliefert, wurden hierzu in Südafrika um 1900 die ersten gravimetrischen Staub-Bestimmungen mit Baumwollfiltern und sogenannten sugar-tube Filtern unternommen³⁵. Beide Methoden suchten die gesundheitlichen Folgen von Feinstaub durch dessen Gewicht zu bestimmen. Während Baumwollfilter vor und nach standardisiertem Durchsatz der staubbelasteten Luft gewogen wurden, hat man die sugar-tubes nach Staubabscheidung in Wasser aufgelöst und die nicht wasserlöslichen Teile als Staubgewicht bestimmt.

Diese ersten Messungen erwiesen sich vermutlich deshalb als wenig erfolgreich, weil auch punktuelle Reduktionen des Staubs zu keiner Verringerung der Prävalenz von Lungenkrankheiten führten und die Kohlearbeiter nicht in der Lage waren, gegenüber den Minenbesitzern effektive Änderungen des Gesundheitsschutzes durchzusetzen. Eine darin bereits erkennbare Lücke zwischen Staub-Messungen und deren Relevanz und Verwertbarkeit hinsichtlich des Gesundheitsschutzes besteht nach wie vor – trotz, aber auch wegen der, durch die in der 39. BImSchV vorgeschriebenen, technischen Verfeinerungen der Wägungen.

Die Luftqualitätsrichtlinie 2008 der EU³⁶ und die daraus abgeleitete 39. BImSchV nennen für die verschiedenen Luftschadstoffe Grenzwerte, bei deren Überschreitung sogenannte Luftreinhaltepläne der EU vorgelegt werden müssen, mit denen eine Rückführung auf zulässige Werte erreicht werden soll. Die aktuell gültigen Grenzwerte für zulässige Immissionen bzgl. Feinstaub in der Außenluft sind in Tabelle 1, S.6 dargestellt.

In der öffentlichen Debatte der letzten Jahre in Deutschland (s. Kap. 9) wurden lediglich die Grenzwerte der 39. BImSchV als solche in Frage gestellt, während die vorgelagerte und weitaus fundamentalere Problematik der Definition geeigneter Zielgrößen für Luftschadstoffe im Hinblick auf deren gesundheitliche Bedeutung für den Menschen außer Betracht blieb. Damit ist die gesetzlich festgelegte Form der Bestimmung von Feinstaub

³⁵ FIELDNER, Arno Carl, KATZ, Sidney Hershberg & LONGFELLOW, Erskine Shearer 1921. *The Sugar-Tube Method of Determining Rock Dust in Air*, Washington, D.C., U.S. Government Publishing Office (GPO).

³⁶ Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa

mit der offiziellen Zielsetzung „zum Schutz der menschlichen Gesundheit“ ohne Bezug auf dessen Toxizität und Größenverteilung vergleichbar mit einem Versuch, den ‚Gesundheitswert eines Einkaufs von Lebensmitteln im Supermarkt‘ allein durch dessen Gewicht bestimmen zu wollen.

Obwohl die Aerosolforschung seit geraumer Zeit über Mess- und Analysetechniken verfügt, mit denen neben dem Staubgewicht eine Reihe für die menschliche Gesundheit hochsignifikanter Parameter in Echtzeit gemessen und online verfügbar gemacht werden können, heißt es in §4 (1) der heute gültigen 39. BImSchV

"Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über den Tag gemittelte Immissionsgrenzwert für Partikel PM₁₀ 50 µg pro Kubikmeter bei 35 zugelassenen Überschreitungen im Kalenderjahr".

Entsprechend kann die 39. BImSchV mit der Bestimmung/ Wägung allein des Staubgewichts ohne Berücksichtigung aller anderen Merkmale luftgetragener Stäube nicht als ‚wissenschaftlich begründet‘³⁷ gelten.

Jede in Teil 2 der 39. BImSchV genannte Beschränkung bezüglich Luftbelastungen durch Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid, Blei, Benzol, bodennahes Ozon, Arsen, Kadmium, Nickel, Benzo[a]pyren und Feinstaub PM₁₀ bzw. PM_{2,5} wird durch die Zielsetzung ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ eingeleitet. Damit wird eine Gewissheit suggeriert, die ohne nähere Beschreibung keineswegs gegeben ist. Zwar wird die gesundheitliche Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen regelmäßig und hinreichend durch diverse Studien belegt sowie in internationalen Reviews zusammengefasst (vgl. Kap. 4), die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit unternommene umfängliche Suche nach einer ‚protokollierten‘, d.h. nachvollziehbaren Erklärung für das Zustandekommen normativer Regelungen und insbesondere der Festlegung von Grenzwerten für Luftbelastungen durch die derzeit gültige 39. BImSchV bzw. 2008/50/EG hat sich als aussichtslos erwiesen. Schon im BImSchG der ersten Ausgabe von 1974 waren ähnliche Grenzwerte für PM₁₀ vorgeschrieben: „Darin geregelt waren

³⁷ Nach: KÖHLER, Dieter, HETZEL, Martin, KLINGNER, Matthias & KOCH, Thomas 2018. *Stellungnahme zur Gesundheitsgefährdung durch umweltbedingte Luftverschmutzung, insbesondere Feinstaub und Stickstoffverbindungen (NO_x)* [Online]. Verfügbar unter: https://www.lungenaerzte-im-netz.de/fileadmin/pdf/Stellungnahme__NOx_und__Feinstaub.pdf [Abgerufen am 04.10.2021 2021]. Originalwortlaut: „Jedoch sehen sie derzeit keine wissenschaftliche Begründung für die aktuellen Grenzwerte für Feinstaub und NO_x.“

Immissionsbegrenzungen für 8 gasförmige Stoffe und ein Jahresmittelwert $<10 \mu\text{m}$ von $0,10 \text{ mg/m}^3$ oder alternativ ein JMW von $0,20 \text{ mg/m}^3$ für Gesamtstaub.“³⁸

D.h. Form und Begründung der 39. BImSchV erfüllen nicht die wissenschaftlichen Kriterien des ‚Reproducible Research‘, wie sie derzeit für datengestützte Stellungnahmen im universitären Bereich als Standard gelten. Als Konzept für die reproduzierbare Veröffentlichung moderner Datenanalysen bezeichnet Reproducible Research die Idee, dass Datenanalysen, und allgemeiner, wissenschaftliche Ergebnisse, mit ihren Daten und ihrem Softwarecode veröffentlicht werden, damit andere Wissenschaftler und Stakeholder die Ergebnisse überprüfen und darauf aufbauen können³⁹. Mit der mehrfach wiederholten Phrase ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ benennt die 39. BImSchV die Zielsetzung ihrer Regelungen, ohne jedoch deren wissenschaftlich-politische Begründung zu erwähnen.

Auch die Festsetzung der Zulässigkeit von bis zu 35 Überschreitungen des festgelegten Tagesmittelwerts für PM_{10} von $50 \mu\text{g/m}^3$ pro Messstation und Jahr ist ohne nähere Definition besonders für vulnerable Gruppen geradezu fahrlässig ungenau. Weder das Ausmaß der 35 Überschreitungen von PM_{10} noch deren Verteilung im Jahr sind durch die Vorgaben geregelt. D.h. es gelten ggfs. 35 derartige Tage in Folge und in beliebiger Höhe der Überschreitungen als zulässig.

Die laufend als „Aktuelle Luftdaten“ des UBA herausgegebenen Daten⁴⁰ bescheinigen die Konformität mit den gesetzlichen Regelungen, was aber nicht über die hohe Anzahl von Einzelüberschreitungen hinwegtäuschen sollte: Bis einschließlich Juni 2019 gab es 1.176 Einzelüberschreitungen des Tagesgrenzwerts an 310 Messstationen.

Im Jahr 2018 waren es insgesamt 2.567 Einzelüberschreitungen⁴¹. Warum für die Jahre 2018/ 19 nur Daten von 310, 366 bzw. 382 Stationen angegeben werden, während an anderer Stelle für 2013 deutschlandweit insgesamt etwa 640 Messcontainer angegeben

³⁸ BITTIG, Margot & HAEP, Stefan 2014. Maßnahmen zur Minderung luftseitiger Emissionen unter besonderer Berücksichtigung von Quecksilber, Feinstaub und Stickoxiden. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. & BECKMANN, M. (eds.) *Energie aus Abfall*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.

³⁹ Vgl. PENG, Roger D & HICKS, Stephanie C 2021. *Reproducible research: A retrospective*. Annual review of public health, 42, 79-93.

⁴⁰ UMWELTBUNDESAMT. 2019. *Aktuelle Luftdaten* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle-luftda-ten#/transgressions> [Abgerufen am 27.06.2019].

⁴¹ UMWELTBUNDESAMT 2013. *Das Luftmessnetz des Umweltbundesamts: Langzeitmessungen, Prozessverständnis und Wirkungen ferntransportierter Luftverunreinigungen*, Dessau-Roßlau Umweltbundesamt.

wurden, bleibt offen. Der Verbleib von über 250 Messstellen in fünf Jahren wird an keiner Stelle erwähnt.

Abbildung 5 zeigt die Häufigkeiten von Überschreitungen des Tagesgrenzwerts für PM₁₀ im ersten Halbjahr 2019. Nur an 19% (72) der Messstationen gab es im ersten Halbjahr 2019 keine Überschreitung, an 89 Messstellen wurde eine, an 65 wurden zwei gemessen usw. Deutschland liegt mit diesen Werten⁴² nicht nur weit über den Empfehlungen der WHO, die bei 45 µg/m³ am Tag⁴³ keine Überschreitungen vorsieht, sondern versäumt auch, Regelungen zu deren Häufigkeit und Agglomeration zu formulieren.

Eine Vervollständigung der oben aufgeführten „Aktuellen Luftdaten“ des UBA zu PM₁₀ auf das gesamte Jahr 2019 führte zu Widersprüchen: insgesamt wurden zum Halbjahr 1176 Überschreitungen dokumentiert, am Ende des Jahres waren es jedoch ‚nur‘ 1326. Im ersten Halbjahr wurden 382 Stationen mit Überschreitungen angegeben, Ende 2019 waren es nur noch 366. Es sind also 16 Stationen mit insgesamt 29 Überschreitungen im zweiten Halbjahr 2019 weggefallen, darunter z.B. in Konstanz, Luckenwalde, Ludwigsburg und Berlin-Friedrichstraße. Bei 5 Stationen ist die Differenz aus Jahres- und Halbjahreswert sogar negativ.

Das heißt, es waren im ersten Halbjahr bereits Überschreitungen gemeldet, die zum Jahresende nicht mehr vorkamen. Diese dubiosen Abweichungen und ex post Korrekturen werden vom UBA weder angemerkt noch kommentiert.

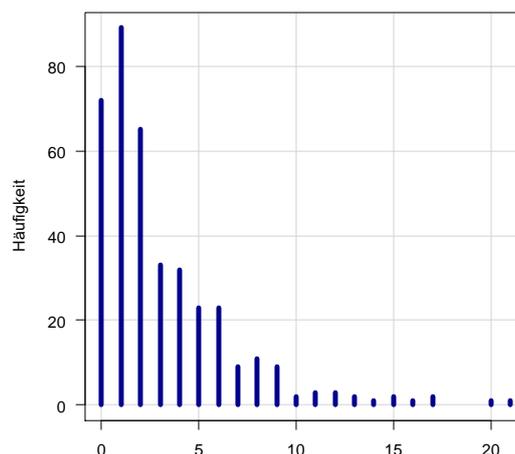


Abbildung 5: Messstellen mit Überschreitungen des Tagesgrenzwerts von PM₁₀ im 1. Halbjahr 2019

⁴² UMWELTBUNDESAMT. 2020a. *Aktuelle Luftdaten* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten/jahresbilanzen/eJxrWpScv9BwUWXqEiMDQ0sAMLQFuQ==> [Abgerufen am 13.04.2020].

⁴³ neue Werte seit 2021

Die 39. BImSchV bleibt darüber hinaus mit den univariaten Grenzwerten ohne jeden Bezug zu deren additiver Wirkung. Das hat u.a. zur Folge, dass alle Luftbelastungen, innerhalb derer keiner der fünf Grenzwerte überschritten ist, hinsichtlich der Gefährdung der menschlichen Gesundheit als gleichwertig und zulässig gelten. Insbesondere gilt hiernach eine Konstellation, bei der sämtliche Parameter exakt den Grenzwert einnehmen, aber nicht überschreiten, als gleichwertig mit allen Luftbelastungen, bei denen sämtliche Parameter extrem kleine Werte besitzen. Es braucht keine große Expertise, um diese Festlegung als hochproblematisch zu sehen.

Die durch internationale, empirische Studien gut belegte Multikollinearität der Luft-Schadstoffe hinsichtlich gesundheitlicher Folgen für den Menschen bleibt durch die univariaten Grenzwertsetzungen, d.h. ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen der Schadstoffe, vollkommen unberücksichtigt.

Die in diesem Zusammenhang vom Umweltbundesamt und – z.T. verschieden davon – in den Umweltministerien der Bundesländer definierten sogenannten Luftqualitäts-Indizes, beheben das Problem der Multikollinearität ohne Bezug zur eigentlichen Zielgröße ‚menschliche Gesundheit‘ nicht.

Jenseits der Kritik an einer gravimetrischen Bestimmung von Feinstaub in der Außenluft ist die Verfügbarkeit der rechtsverbindlichen Normen, auf die in der 39. BImSchV verwiesen wird, mit Hindernissen versehen. Die für Deutschland relevanten DIN-Normen stehen nicht, wie sonst heute für Gesetze üblich, im Internet zur Verfügung, sondern können nur in Bibliotheken einiger deutscher Universitäten eingesehen⁴⁴ oder müssen käuflich erworben werden. Ein Kauf aller Hardcopy DIN – Normen, die für die 39. BImSchV von Relevanz sind, verursacht Kosten in Höhe von über 2500 €. Auch für die Einsicht in das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs⁴⁵ ist der Zugang erschwert, eine Schwelle, die nur durch eine Investition von 250 Euro zu überwinden ist. Nach der Aarhus Konvention⁴⁶ wäre eine andere Handhabung zu erwarten.

⁴⁴ Dort dürfen die Normen nicht kopiert/ ausgedruckt werden.

⁴⁵ INFRAS. 2020. *Willkommen zu HBEFA* [Online]. Bern: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.hbefa.net/d/> [Abgerufen am 25.05.2020]. Das Handbuch für Emissionsfaktoren stellt Emissionsfaktoren für die gängigsten Fahrzeugtypen zur Verfügung.

⁴⁶ DEUTSCHE UMWELTHILFE E.V. o. J. . *Die Aarhus Konvention* [Online]. Radolfzell: Deutsche Umwelthilfe e.V. Verfügbar unter: <https://www.right-to-clean-air.eu/hintergruende/aarhus-konvention/> [Abgerufen am 27.05.2020].

5.3 Fragestellungen und Prozess zur Festsetzung von Grenzwerten

Der in 5.1 beschriebene Mangel an einschlägiger Begründung der Grenzwertfestlegung für Feinstaub stellt allerdings nicht allein ein Versehen oder Versäumnis des Gesetzgebers dar. Er verweist auch auf die dem Problem innewohnenden, vielfältigen Schwierigkeiten einer solchen Festlegung, die auch in dieser Arbeit nicht geklärt werden können. Sie lauten in Bezug auf die Wirkung von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit exemplarisch etwa:

- Welche Feinstäube/ Aerosole sind tendenziell schädlich?
- Welche Dosis-Wirkungs-Beziehungen werden erforscht/ unterstellt?
- Sind die potenziellen gesundheitlichen Wirkungen kurz- oder langfristig?
- Sind die Wirkungen für alle Menschen gleich?
- Welche Rolle spielt die Partikelgröße bzw. deren Verteilung?
- Welche Partikel gelangen in welche Bereiche des menschlichen Körpers?
- Welcher Anteil der eingeatmeten Partikel verbleibt im Menschen?
- Welche Grenzen hat die Verwendung des "aerodynamischen" Durchmessers?
- Welche Rolle spielt die Form der Feinstaubpartikel?
- Warum wird nur das maximale Staubgewicht gesetzlich festgeschrieben?
- Sind die gravimetrisch bestimmten Fraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ hinreichend?
- Sind die gesetzlichen Regelungen für ultra-Feinstaub zu ergänzen?
- Welchen Einfluss haben Mittelwertbildungen der Messungen auf deren prädiktive Güte?
- Wie ist die Toxizität der Aerosole zu berücksichtigen?
- Liefern gravimetrische Bestimmungen von Feinstaub hinreichend differenzierte Informationen?
- Welche Alternativen zur gravimetrischen Filtertechnik stehen zur Verfügung?
- Welche öko-sozialen Einflüsse sind bei der Definition von Grenzwerten zu berücksichtigen?
- Wie sinnvoll sind die Ortsbestimmungen für Messgeräte und inwiefern sind Messungen regional repräsentativ?
- Welche Bedeutung hat § 29 der 39.BImSchV bzgl. grenzüberschreitender Luftbelastungen?

Wissenschaftliche Forschung kann bei Vorliegen entsprechender Daten den quantitativen Zusammenhang von gesundheitlichen Folgen durch Luftbelastungen in statistischen Modellen quantitativ beschreiben, mit denen – idealtypisch – das ‚attributable risk‘ der Luftbelastung hinsichtlich gesundheitlicher Folgen quantitativ bestimmt, d.h. von anderen Ursachen getrennt dargestellt werden kann. Eine endgültige Festlegung der Grenzwerte ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ benötigt jedoch, wie oben

bereits erwähnt, eine politische Abwägung, bei der die Regelungen zur Gesundheitsvorsorge mit deren Machbarkeit und möglichen Kosten auf anderen Gebieten konkurrieren. Ähnlich gesetzlichen Vorgaben bzgl. Tempolimit von 50 km/h innerorts, Höchstalter von Amateurboxern, Mindestalter bei Führerscheinerwerb, Alter bei beginnender Schulpflicht etc. haftet auch den Grenzwerten der 39. BImSchV trotz der Expertise der an der Gesetzgebung beteiligten Wissenschaftler, Juristen und Mediziner eine streitbare Beliebigkeit an. Und dies nicht zuletzt, weil eine größere Zahl empirischer Studien inzwischen zeigen, dass erhebliche gesundheitliche Belastungen bereits deutlich unterhalb der gesetzten Grenzwerte gehäuft auftreten. Im Unterschied jedoch zu den hier genannten Beispielen, bei denen die Dimension der univariaten Zielgrößen (Geschwindigkeit bzw. Zeit) begrifflich genauestens bekannt sind, ist Feinstaub als multivariablen Konstrukt bestehend aus Gewicht, Partikelgröße und Form, Toxizität, Herkunft/ Quelle, elektrische Ladung, Radioaktivität etc. zu sehen, von denen allein das Staubgewicht in der 39. BImSchV durch Obergrenzen reglementiert ist, während alle anderen, für die menschliche Gesundheit extrem wichtigen Eigenschaften des Feinstaubes und die individuellen Bedingungen der Exposition unberücksichtigt bleiben, wie die folgende Abbildung 6 am Beispiel PM_{10} zeigt.

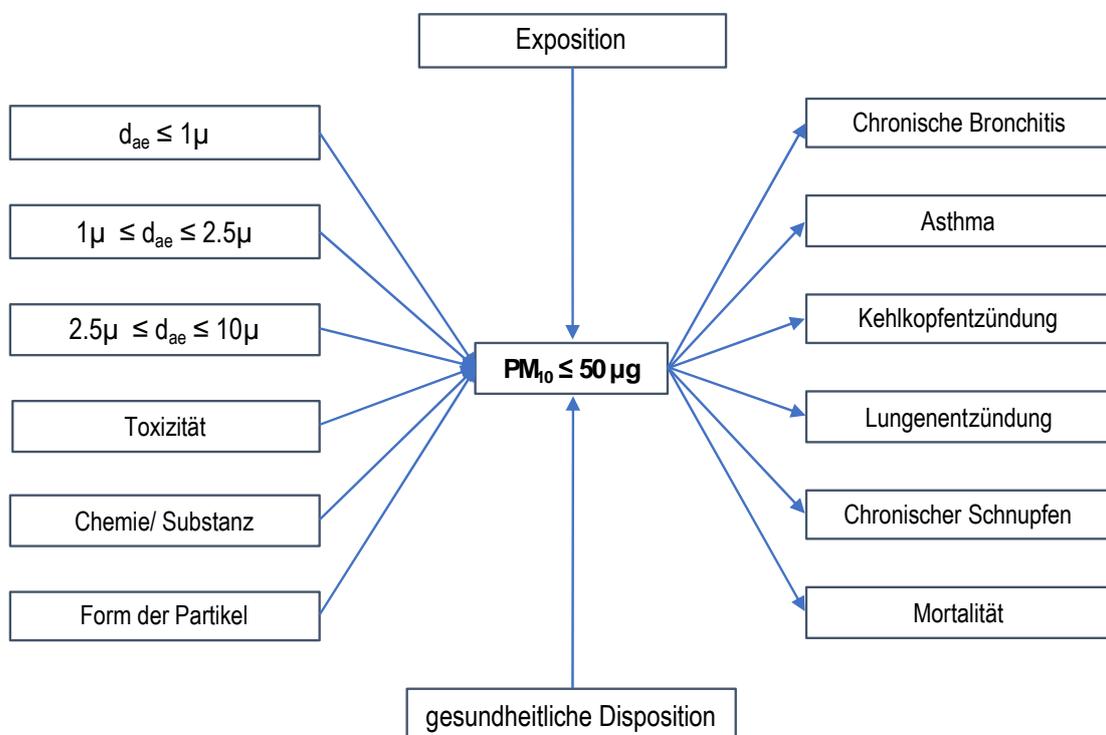


Abbildung 6: Bias of omitted variable

Das Immissionsschutzgesetz zielt darauf ab, die Immissionen durch Begrenzung der Emissionen zu kontrollieren. Für die Zuordnung von Staubbelastungen zu den verursachenden Emissionsquellen kommen grundsätzlich zwei Verfahren in Frage. In sog. Rezeptormodellen werden die Feinstaub-Immissionen durch chemische bzw. physikalische Analyse typischer Teilchengrößen (z.B. direct reading Verfahren) und Inhaltsstoffen der Reaktionsprodukte der Emissionsprozesse zugeordnet und können so zurückverfolgt werden. Die Zuordnung der Quellen zu den Ergebnissen einer chemischen Analyse ist aber nicht immer eindeutig möglich.

Alternativ kann der Feinstaub direkt an den Emissionsquellen durch jeweils passende Methoden⁴⁷ bestimmt und in einem geografischen Kataster festgehalten werden. In atmosphärischen Ausbreitungsmodellen wird der Versuch unternommen, die Transmission des Feinstaubes, d.h. seinen Transport, seine Verdünnung und chemische Umwandlung unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Daten zu simulieren, so z.B. im Chemie-Transport-Modell EURAD des Rheinischen Instituts für Umweltforschung⁴⁸, auf dessen Basis die potenzielle Entwicklung der Luftqualität durch Maßnahmen der Emissionsreduktion im NEC-Compliance-Szenario geschätzt wird.

Die Modelle zu beurteilen ist ein weites Feld für eine weitere umfangreiche Arbeit. Fest steht aber, dass es eine für alle Regionen, Wetterlagen, Tages- und Jahreszeiten, Verkehrsdichte etc. einheitliche Beziehung zwischen Emission und Immission nicht gibt. D.h. keine der gesetzlich vorgeschriebenen Abgasnormen (z.B. für Automobile, Industrie etc.) garantiert die Einhaltung der in der 39. BImSchV gesetzlich vorgeschriebenen Höchstwerte für die entsprechenden Immissionen. Immissionen sind neben den verursachenden Emissionen lokal von einer Reihe weiterer Einflussgrößen wie Verkehrsaufkommen, Verkehrsregelung, Stadtlage, meteorologische Parameter, Art und Nähe zu Industrieanlagen etc. abhängig. Die Immissionen können auf Basis von Emissionskatastern daher immer nur sehr grob abgeleitet werden.

Entscheidend für die Gesundheit der Menschen sind die Werte der Immission, die öffentliche Debatte aber hat primär Emissionen – und hier fast ausschließlich die der

⁴⁷ Die Emissionsdaten in Deutschland beruhen auf Emissionswerten des Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEFA) in der Version 3.3., erschienen im April 2017, in der die Emissionsfaktoren aller Euro 4, 5 und 6 Diesel-Pkw erhöht wurden.

⁴⁸ NATIONALES LUFTREINHALTEPROGRAMM 2019. *Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland nach Artikel 6 und Artikel 10 der Richtlinie (EU) 2016/2284 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe sowie nach §§ 4 und 16 der Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion bestimmter Luftschadstoffe (43. BImSchV)*

Kraftfahrzeuge – im Blick, die nach Schätzung des UBA mit nur etwa 14% an der Erzeugung von Feinstaub beteiligt sind.

Eine zweite Problematik besteht in der undifferenzierten Verwendung der Zielgröße ‚menschliche Gesundheit‘. Die einschlägige wissenschaftliche Literatur zur medizinischen Aerosolforschung⁴⁹ beschreibt z.B. den Zusammenhang von Partikelgröße und für Partikel durchlässige Regionen des Atemtrakts sowie die daraus resultierenden gesundheitlichen Risiken (siehe Kap. 8.4, S. 61). Darüber hinaus spielt das Ausmaß der Exposition sowie die gesundheitliche Disposition der Individuen eine wichtige Rolle. In Summe ergibt sich hieraus ein äußerst komplexes Netzwerk, welches durch Angabe einer Zahl (hier exemplarisch 50 µg für PM₁₀) auch nicht annähernd abgebildet werden kann. Wie die vorstehende Grafik andeutet, benötigte eine substantielle Begründung der angegebenen Grenzwerte eine nicht zu realisierende große Zahl von Dosis-Wirkungs-Funktionen, für die jeweils ein cut-off ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ gesellschaftlich-politisch zu bestimmen wäre.

Angesichts der inzwischen gesicherten Forschungsergebnisse, wonach gesundheitliche Einschränkungen durch Feinstaub in der Luft bereits deutlich unter den vorgegebenen Grenzwerten auftreten, erscheint das 8-Stunden-moving average⁵⁰ über den Tag wegen seiner nivellierenden Eigenschaft ungeeignet.

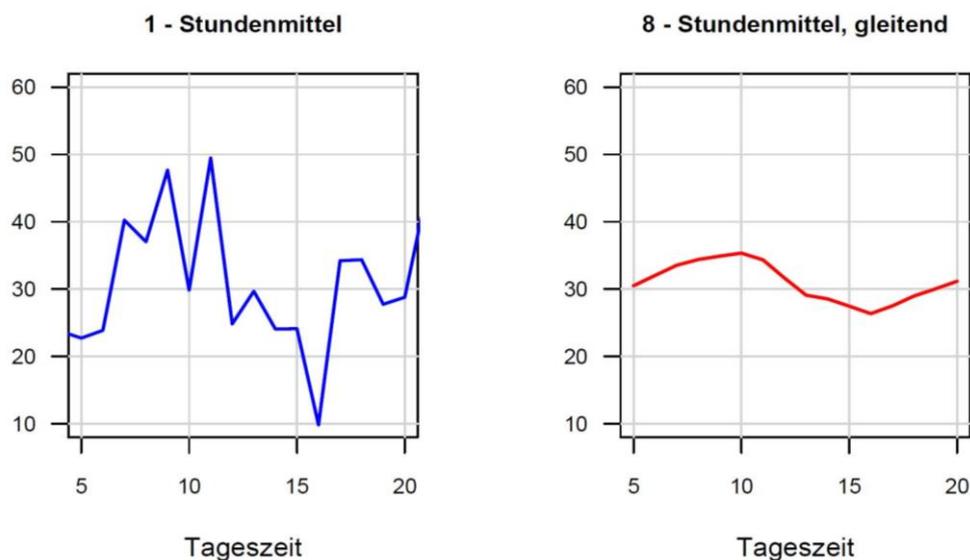


Abbildung 7: Bedeutung des moving average über 8 Stunden in der 39. BImSchV

⁴⁹ VINCENT, James H. 2007. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*, New York, John Wiley & Sons.

⁵⁰ 39. BImSchV unter §1,13; Anlagen 7A, 11A, 12

Abbildung 7 veranschaulicht die Wirkung des in der 39. BImSchV vorgeschriebenen ‚moving average‘, das aus den stark schwankenden 1-Stundenwerten eines Tages gleitende 8-Stunden-Mittel mit wesentlich kleineren Amplituden erzeugt und somit möglicherweise kurzfristige, gesundheitliche Folgen von Luftbelastungen verdeckt und das Signal einer Grenzwertüberschreitung sicher verhindert.

5.4 Begrifflich-definitiorische Unklarheiten der 39. BImSchV

Die 39. BImSchV enthält eine Reihe inhaltlich und begrifflich-sprachlicher Ungenauigkeiten, die vermeidbar wären. Die Barriere für die Zugänglichkeit der Bestimmungen wird durch ungenaue Formulierungen unnötig erhöht.

Die folgende Kritik bezieht sich neben den allgemeinen Definitionen primär auf die den Feinstaub betreffenden Passagen der 39.BImSchV, wenngleich die kritisierten Formulierungen allgemein gültig sind.

§1, Nr. 7 Begriffsbestimmungen

Emissionsbeiträge aus natürlichen Quellen sind Schadstoffemissionen, die nicht unmittelbar oder mittelbar durch menschliche Tätigkeit verursacht werden, einschließlich Naturereignissen wie Vulkanausbrüchen, Erdbeben, geothermischen Aktivitäten, Freilandbränden, Stürmen, Meeresgischts oder der atmosphärischen Aufwirbelung oder des atmosphärischen Transports natürlicher Partikel aus Trockengebieten.

Richtig müsste es heißen „Emissionen aus natürlichen Quellen sind Schadstoffemissionen, ...“. Der Begriff „Emissionsbeiträge“ lässt offen, wozu Emissionen aus natürlichen Quellen beitragen.

„Nicht unmittelbar oder mittelbar“ ist logisch äquivalent mit „mittelbar oder mittelbar“ und somit sinnlos. Es ist zu vermuten, dass die Verfasser „weder unmittelbar noch mittelbar“ meinten. Streng genommen reduziert dieser Fehler Emissionen aus natürlichen Quellen auf jene, die mittelbar durch menschliche Tätigkeit verursacht werden.

„Einschließlich Naturereignissen wie Vulkanausbrüchen ...“ erscheint sinnlos, zumal die Mehrzahl der genannten Quellen bzw. Ursachen vollständig ohne menschliche Tätigkeit ihren Beitrag leisten.

§1, Nr. 13 Begriffsbestimmungen

„höchster Achtstundenmittelwert eines Tages ist ein Wert, der ermittelt wird, indem die gleitenden Achtstundenmittelwerte aus Einstundenmittelwerten gebildet und stündlich aktualisiert werden; jeder auf diese Weise errechnete Achtstundenmittelwert gilt für den Tag, an dem dieser Zeitraum endet; das heißt, dass der erste Berechnungszeitraum für jeden einzelnen Tag die Zeitspanne von 17.00 Uhr des vorangegangenen Tages bis 1.00 Uhr des betreffenden Tages umfasst, während für den letzten Berechnungszeitraum jeweils die Stunden von 16.00 Uhr bis 24.00 Uhr des betreffenden Tages zu Grunde gelegt werden.“

Der Bezug auf die nicht definierten Einstundenmittel stellt derzeit eine Definitionslücke dar. Die ohnehin etwas weitschweifige Formulierung des o.g. §1 Absatz 13 der 39. BImSchV übersieht offenbar, dass die Definition der Einstundenmittel eine analoge Abbildung eines Kontinuums auf eine Zahl benötigt, deren Charakteristik festgelegt werden muss.

Die Zurechnung eines Achtstundenmittels zu dem Tag, auf den die letzte Stunde der Berechnung fällt, ist statistisch zwar nicht generell von Bedeutung, kann aber z.B. beim Übergang von Wochentagen zum Wochenende und umgekehrt durchaus eine Rolle spielen. Eine Zurechnung auf den Tag, in dem z.B. mindestens die Hälfte der Messungen lagen, wäre naheliegender. Jedenfalls ist eine Zuordnung der Werte von maximal sieben Stunden des Vortages auf den laufenden Tag erklärungsbedürftig.

Die über den Tag schwankenden Luftbelastungen ließen sich auf viele Arten zu einem Tageswert aggregieren. Bei kontinuierlichen Messungen, die in einigen Bundesländern bereits aufgezeichnet werden, wäre etwa die AUC⁵¹ eines Tages die sinnvolle Wahl, bei der sich u.a. die ungeklärte Stundenmittelung erübrigte.

§4 Immissionsgrenzwerte für Partikel (PM₁₀)

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über den Tag gemittelte Immissionsgrenzwert für Partikel PM₁₀ 50 Mikrogramm pro Kubikmeter bei 35 zugelassenen Überschreitungen im Kalenderjahr.

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit beträgt der über ein Kalenderjahr gemittelte Immissionsgrenzwert für Partikel PM₁₀ 40 Mikrogramm pro Kubikmeter.

Es gibt in der 39. BImSchV weder einen über den Tag noch über das Jahr gemittelten Immissionsgrenzwert. Für PM₁₀ sind Tages- und Jahresgrenzwerte mit 50 bzw. 40 µg/m³ fest vorgegebene Werte, für die eine Mittelung keinen Sinn macht. Offenbar ist mit „über den Tag gemittelte Immissionsgrenzwert“ der in §1 Absatz 13 bestimmte höchste Achtstundenmittelwert eines Tages gemeint. Beim Jahresbezug bleibt allerdings völlig offen, was unter „über ein Kalenderjahr gemittelte Immissionsgrenzwert“ zu verstehen ist. Es fällt zudem grundsätzlich schwer, 35 zulässige Überschreitungen als „zum Schutz der menschlichen Gesundheit“ zu interpretieren, insbesondere deshalb, weil für die zulässigen 35 Überschreitungen keinerlei Obergrenzen vorgegeben sind.

Ungenauigkeiten und Inkonsistenzen in der Formulierung von Gesetzestexten - wie die hier genannten - werfen die Frage auf, welchen Stellenwert ein ernsthafter Gesundheitsschutz auf der politischen Agenda Deutschlands einnimmt.

⁵¹ Area Under the Curve

5.5 Sonderstellung für Schiffs- und Flugverkehr

Schiffs- und Flugverkehr erhalten durch die Festlegung in §1 Nr. 6 der 39. BImSchV eine Sonderstellung

"Emissionen sind Schadstoffe, die durch menschliche Tätigkeit aus Quellen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und ihrer ausschließlichen Wirtschaftszone freigesetzt werden, ausgenommen Schadstoffe des internationalen Seeverkehrs und von Flugzeugen außerhalb des Lande- und Startzyklus."

D.h. per definitionem sind Emissionen von Schiffen und Flugzeugen (außerhalb von Start und Landung) keine Schadstoffe.

Container-Schiffe gelten einerseits wegen der pro Tonnenkilometer vergleichsweise geringen CO₂ Emission als klimafreundlich, sie verursachen aber Luft- und Wasserverschmutzungen, die nach Angaben der EU-Kommission pro Jahr in Europa den vorzeitigen Tod von etwa 50.000 Menschen zur Folge haben. Die 15 größten Containerschiffe der Welt emittieren derzeit mehr Schwefeloxide als 750 Millionen PKW. Sie verbrennen außerhalb der Kontinentalzonen immer noch stark schwefelhaltige Treibstoffe ohne Abgasfilter. Besondere Belastungen werden in allen Hafenstädten beobachtet⁵².

Der Wissenschaftliche Dienst des Bundestages übernimmt das Ergebnis des NABU und stellt fest:

„Ob in Hamburg, Warnemünde oder Kiel: Überall gaben die gemessenen Werte Anlass zur Sorge. Sie liegen in den Abgasfahnen der Schiffe teilweise mehr als hundertfach über der ortsüblichen Partikelkonzentration, der sogenannten Hintergrundbelastung. Im Vergleich zu sauberer Luft in der freien Natur überstieg die Schadstoffmenge den Wert teilweise sogar um den Faktor 400“⁵³

Die internationalen Vereinbarungen bezüglich Schiffsemissionen durch Container- und Kreuzfahrtschiffe auf offenem Meer und küstennahen Emission Control Areas (ECA), Sulphur Emission Control Area (SECA) bzw. Nitrogene Emission Control Area (NECA) werden von der UNO-Behörde IMO (International Maritime Organization) festgelegt⁵⁴ und haben zu einer sich häufig selbst erneuernden Vielfalt von Bestimmungen geführt,

⁵² Letzter Absatz in Anlehnung an: DIESENER, Sönke. 2017. *Emissionen aus der Schifffahrt: Gefahr für Klima und Gesundheit* [Online]. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Verfügbar unter: <https://www.wissenschaftsjahr.de/2016-17/aktuelles/das-sagen-die-experten/emissionen-aus-der-schifffahrt-gefahr-fuer-klima-und-gesundheit.html> [Abgerufen am 14.5.2021].

⁵³ WISSENSCHAFTLICHE DIENSTE DES DEUTSCHEN BUNDESTAGS 2019. *Ausarbeitung: Einschränkung des Schiffsverkehrs auf der Grundlage von Emissionswerten*, Berlin, Deutscher Bundestag.

⁵⁴ Basierend auf Anlage VI zur „International Convention for the Prevention of Pollution from Ships“ (MARPOL, 1978).

bei denen auch Änderungen an noch nicht umgesetzten Vorschriften vorgenommen werden.

Die Internationale Schifffahrts-Organisation (IMO) hat bereits 2016 weltweit den Grenzwert für den Schwefelgehalt im Treibstoff der Schiffe ab 2020 auf 0,5 Prozent festgesetzt. In den o.g. Schutzgebieten gilt seit dem 1. Januar 2020 der Schwefel-Grenzwert 0.1%. Bis dahin verbrannten Container- und Kreuzfahrtschiffe außerhalb der ECAs Schweröl mit 3.5% Schwefel. Grenzwerte für Emissionen von Feinstaub und Ruß existieren in der Schifffahrt nach wie vor nicht⁵⁵.

Zum Vergleich: Nach der EuroNorm 5 darf Diesel maximal 10 mg/kg, d.h. 0.001% Schwefel enthalten, während beim Heizöl noch immer 2000 mg/kg zulässig sind. Vor der neuen internationalen Regelung von 2020 stießen Kreuzfahrt- und Containerschiffe genauso viele Schadstoffe aus wie 5 Millionen PKW. Anders als bei PKW und LKW im Straßenverkehr ist bisher bei Schiffen in Binnen- und Seeschifffahrt keinerlei Abgas-technik gesetzlich vorgeschrieben.

⁵⁵ WISSENSCHAFTLICHE DIENSTE DES DEUTSCHEN BUNDESTAGS 2019. *Ausarbeitung: Einschränkung des Schiffsverkehrs auf der Grundlage von Emissionswerten*, Berlin, Deutscher Bundestag.

6 Kategorisierung, Definition und Filterung von Feinstaubfraktionen

Feinstäube bestehen aus luftgetragenen Partikeln, die bzgl. Form, Größe, Oberfläche, Toxizität, Masse, Dichte, Entstehung⁵⁶ und chemischer Zusammensetzung⁵⁷ - im Gegensatz zu Stäuben im handwerklich-industriellen Bereich - stark variieren. Es liegt auf der Hand, dass gesetzliche Vorschriften zur Begrenzung negativer gesundheitlicher Folgen von Luftbelastungen durch Feinstaub im öffentlichen Raum geeignete Kategorisierungen dieser Vielfalt sowie Vorschriften entsprechender Messungen benötigen.

Bezüglich Feinstaub basiert die 39. BImSchV auf folgenden Definitionen und Vorschriften:

- Jedem Staubteilchen wird sein „aerodynamischer“ Durchmesser (d_{ae}) zugeordnet. Dieser ist per definitionem gleich dem Durchmesser eines kugelförmig gedachten Teilchens mit der Dichte $\rho = 1\text{g/cm}^3$, welches in Erdnähe und in ruhender Luft mit derselben Geschwindigkeit zu Boden sinkt wie das betrachtete Staubteilchen.
- Die Staubfraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ beschreiben Stäube, die gröbselektierende Filter passieren, die für Partikel mit $d_{ae} = 10\ \mu\text{m}$ bzw. $d_{ae} = 2.5\ \mu\text{m}$ je einen Abscheidegrad von 50% aufweisen⁵⁸.
- Amtliche Bestimmungen von Feinstaub erfolgen nach den Vorschriften von DIN EN 12341
- Vorschriften bezüglich der zeitlich und räumlich verteilten Messungen und deren statistische Verarbeitung

⁵⁶ primär emittiert oder sekundär gebildet

⁵⁷ bekannt sind über 100 Substanzen: Schwermetalle, Ruß, Kohlenwasserstoffe, Viren, Sporen, Pollen, Bakterien, Pilze

⁵⁸ analog nach Richtlinie 2008/50/EG: "PM10 sind die Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass gemäß der Referenzmethode für die Probennahme und Messung von PM10, EN12341 passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 μm eine Abscheidewirksamkeit von 50% aufweist"

6.1 Aerodynamischer Durchmesser und Sinkgeschwindigkeit

Die Einführung des aerodynamischen Durchmessers stellt einen Versuch dar, die sehr unterschiedlich geformten Staubteilchen zunächst auf Basis ihrer Sinkgeschwindigkeit in Erdnähe und ruhender Luft zu ordnen. Die 39. BImSchV definiert jedoch die beiden Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2,5} nicht allein über die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen, sondern bezieht die Eigenschaften bestimmter Filter mit ein (vgl. Kap. 6.2), was grundsätzlich problematisch/ widersprüchlich erscheint, zumal die Wahrscheinlichkeit eines Teilchens von einem Filter aufgefangen zu werden, keineswegs durch seine Sinkgeschwindigkeit bestimmt wird.

Unabhängig von ihrer Größe, Dichte, chemischen Zusammensetzung etc. werden Staubpartikel nach Definition der 39. BImSchV als identisch festgelegt, wenn sie denselben aerodynamischen Durchmesser besitzen, d.h. in ruhender Luft mit gleicher Geschwindigkeit zu Boden sinken. Obwohl kugelförmige Teilchen in sorgfältig erzeugten Labor-Aerosolen zu finden sind, fallen die meisten Aerosole in der Realität - mit Ausnahme von Nebeln und Sprays - in eine Kategorie von Teilchen, für die es nicht nur eine definierende Dimension gibt. Durch die erfolgte Reduktion auf die Sinkgeschwindigkeit verliert man die Beachtung von Form (Volumen) und Dichte, die gerade für das Abscheideverhalten von Partikeln in Filtern relevant wären. Der aerodynamische Durchmesser ist per definitionem nicht geeignet, bzgl. Form und Dichte zu differenzieren. Allein diese ‚geometrischen‘ Eigenschaften eines Partikels bestimmen aber ganz entscheidend dessen Sinkgeschwindigkeit und sein gesundheitliches Gefährdungspotential.

Mit der Formel von Stokes⁵⁹ ergibt sich für die Sinkgeschwindigkeit v kleiner kugelförmiger Partikel mit einem Durchmesser d und der Dichte ρ in ruhender Luft⁶⁰

$$v = \frac{d^2 \cdot \rho \cdot g}{18 \cdot \eta}$$

Nach Definition des Aerodynamischen Durchmessers kann also ein Partikel, das nach der 39. BImSchV über dieselbe Sinkgeschwindigkeit derselben Fraktion wie ein anderes zugeordnet wird (d.h. mit ihm bzgl. d^2 übereinstimmt), in der Realität z.B. den doppelten

⁵⁹ TOMAS, J. 2016/ 17. *Mechanische Verfahrenstechnik: Einführung in die Partikeltechnologie (Vorlesungsfolien)*, Magdeburg, Universität Magdeburg: Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik. CLIFT, Roland, GRACE, John R & WEBER, Martin E 2005. *Bubbles, drops, and particles*, Mineola, Dover Publications Inc.

⁶⁰ eta [η]: Viskosität der Luft $\eta = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; 1 Pa = $1 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$; 1 N = $1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, ohne Reynolds-Korrektur

Durchmesser und ein Viertel seiner Dichte besitzen. Diese beiden Partikel werden somit nicht mit derselben Wahrscheinlichkeit von einem Filter aufgefangen, was ein Messfehler bezüglich des Staubgewichts bedeutet.

Partikel mit identischem Produkt $d^2 \cdot \rho$ sinken nach Stokes gleich schnell und werden somit in der 39. BImSchV als identisch gesehen, obwohl sie sich in der Realität hinsichtlich ihrer Masse, dem Abscheidegrad am Filter und der gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen i.d.R. deutlich unterscheiden.

Zwei Partikel mit $d_1 = 1 \mu\text{m}$ und $\rho_1 = 1 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ bzw. $d_2 = k \cdot \mu\text{m}$ und $\rho_2 = k^{-2} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ sinken mit k -fachem Durchmesser aber k^{-2} -facher Dichte gleichschnell zu Boden, werden aber mit deutlich verschiedener Wahrscheinlichkeit im Staubfilter abgeschieden und gelangen entsprechend in verschiedene Regionen des menschlichen Atemtrakts.

Die Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit der Staubpartikel vom Quadrat des Durchmessers erweist sich als extrem wichtig. Sehr kleine Teilchen sinken überproportional langsamer zu Boden als größere, was je nach meteorologischen Bedingungen eine Globalisierung insbesondere des sehr feinen Feinstaubes zur Folge hat.

Tabelle 4 veranschaulicht den Einfluss der Partikelgröße auf Sinkgeschwindigkeit, Zeit für das Sinken aus 10 m Höhe auf den Boden und den Ferntransport bei einer Windstärke von 1 m/s.

d_{ae}	Sinkgeschwindigkeit [cm/h]	Sinkzeit aus 10 m Höhe	Horizontaltransport bei 1m/s Windstärke
0,1 μm	0,1	1000 h	3600 km
1 μm	10	10 h	36 km
10 μm	1000	0.1 h	0,36 km

Tabelle 4: Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser⁶¹

Während sehr kleine Partikel ($d \approx 0.1 \mu\text{m}$) aus 10 m Höhe etwa 1000 Stunden in der Luft verbleiben, erreichen 10 μm Partikel aus derselben Höhe den Erdboden bereits nach 6 Minuten. Das heißt, der luftgetragene Feinstaub unterliegt einem kontinuierlichen Selektionsprozess, bei dem die gesundheitlich weniger relevanten, größeren Partikel relativ schnell den Boden erreichen und damit aus dem Kollektiv der Luftbelastung ausscheiden, während die für Mensch, Tier und Fauna relevanten kleineren Partikel

⁶¹ Partikel der Dichte $\rho = 1 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ und Durchmesser $d [\mu\text{m}]$ sinken nach Stokes in Luft etwa mit der Geschwindigkeit $v [\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}] \approx 2,725 \cdot 10^{-5} \cdot d^2$

zum Teil mehrere Tage nach ihrer Entstehung die Luft akkumulierend belasten und in bewegter Luft über größere Strecken transportiert werden können.

Die derzeit gesetzlich fixierte gravimetrische Feinstaubmessung führt also zu entsprechenden Problemen hinsichtlich einer sachgerechten Beurteilung der Gesundheitsgefährdung durch Feinstaub. Die in Abbildung 8 gezeigte⁶² signifikante Abhängigkeit der Sinkzeiten von der Größe der Staubpartikel spielt hinsichtlich der menschlichen Exposition und Atmung eine entscheidende Rolle.

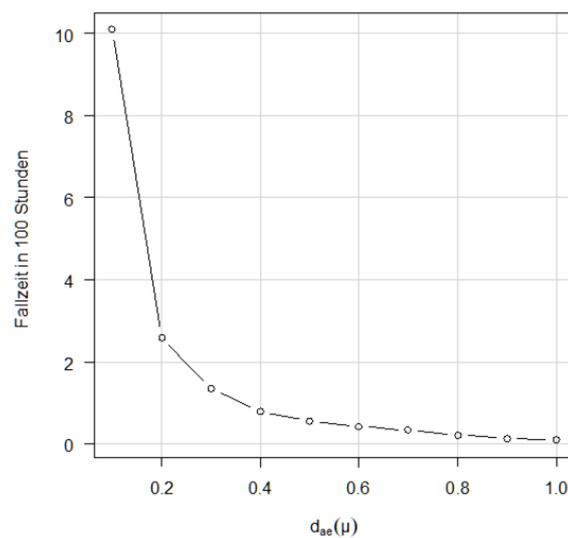


Abbildung 8: Sinken aus Höhe h=10m in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser

6.2 Rolle der Staubfilter bei gravimetrischen Feinstaub-Grenzwerten

Unter § 1 Begriffsbestimmungen der 39. BImSchV heißt es

„PM10 sind Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass⁶³ passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometern einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist.“

Diese Definition ist ohne eine Vorgabe der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Partikelgröße oder zumindest der Varianz unvollständig. Der mediane Abscheidegrad allein bestimmt die Trennfunktion nicht eindeutig. Die in Abbildung 9 exemplarisch dargestellten Trennfunktionen T1 und T2 zweier Staubfilter haben zwar mit $d_{ae}=10 \mu\text{m}$ denselben

⁶² Veranschaulichte Daten aus Tabelle 5

⁶³ Gemeint sind Filter

Median⁶⁴, sie unterscheiden sich aber hinsichtlich ihrer Varianz und damit bezüglich ihrer Staubabscheidung. Bei identischen Stäuben würde ein Filter mit der Trennfunktion T_1 ein größeres Staubgewicht ermitteln als einer mit Trennfunktion T_2 .

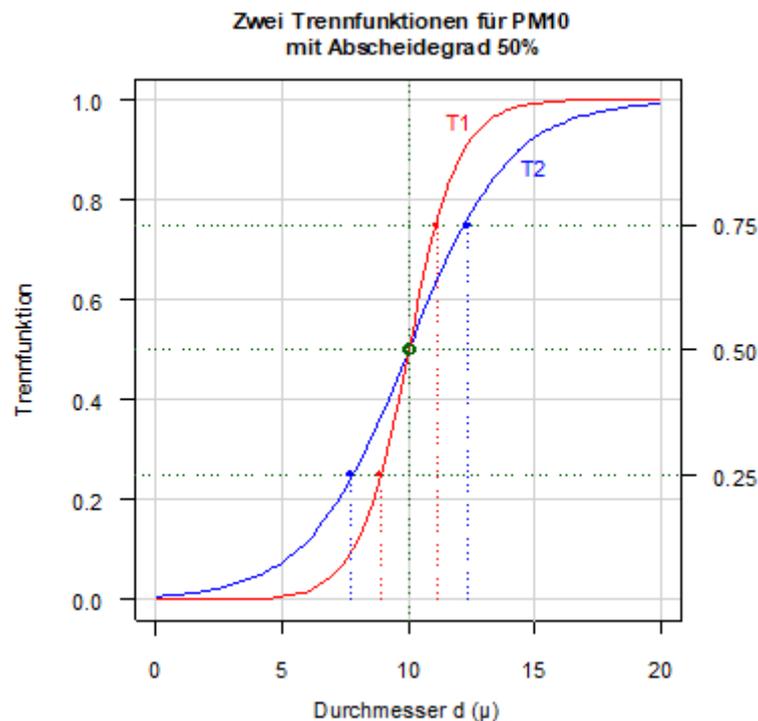


Abbildung 9: Abscheidegrad in Trennfunktionen

Während unter T_1 Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 15 µm nahezu vollständig abgeschieden werden, scheidet ein Filter mit Trennfunktion T_2 bei gleichem Abscheidegrad von 50% für 10 µm-Partikel nur etwa 92% der Partikel mit $d = 15$ µm ab.

Theoretisch sind unendlich viele Filter möglich, die die unvollständige Definition erfüllen, aber ggfs. sehr verschiedene Messungen liefern. Überdies besagt die Angabe des Abscheidegrads von 50% für PM_{10} allein nichts über die Eigenschaften eines solchen Filters gegenüber Partikeln mit einem Durchmesser $d \neq 10$ µm. Zur Festlegung der Trennfunktion eines Filters fehlen z.B. Angaben zu Steilheit, Varianz, Perzentilen 25, 75 etc.

Eine Trennfunktion für $d=10$ µm ohne Fehlasträge $T_{10}(d) = 0$ für $d \leq 10$; 1 für $d > 10$ ist technisch nicht realisierbar. Selbst bei exakter Festlegung der Trennfunktion eines Filters erweist sich die gravimetrisch bestimmte Staubmenge zur Definition von

⁶⁴ Der Median entspricht dem: "Abscheidegrad von 50 Prozent" (Gesetzestext)

Obergrenzen ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ als nur sehr bedingt geeignet, da die Größenverteilung des Staubes von der gravimetrischen Methode per definitionem außer Acht gelassen wird. D.h. das Verhältnis von Menge und Gewicht des vom Filter abgeschiedenen Staubs ist stark von der Größenverteilung des zu messenden Staubs abhängig.

Bei einer wie der o.g. Trennfunktion⁶⁵ bestimmen typischerweise die relativ „schweren“ Partikel das Gesamtgewicht, die mit einer Wahrscheinlichkeit von über 50% im Filter aufgefangen werden. Die i.d.R. sehr große Zahl kleinster Teilchen mit zusammen sehr großer Oberfläche bildet der Messwert hingegen nicht ab.

Die in der 39. BImSchV vorgegebenen Grenzwerte bzgl. Feinstaub beziehen sich ausschließlich auf dessen von der Dichte abhängiges Gesamtgewicht, während die durch Filterungen bestimmten Messungen auf Basis ihrer fiktiven Geometrie, d.h. dem Durchmesser d_{ae} erfolgen. Sowohl der Abscheidegrad von Partikeln in geeichten Filtern als auch ihre Sinkgeschwindigkeit werden durch Größe, Form und Dichte der Teilchen bestimmt. Insofern sind die in der 39.BImSchV festgelegten Grenzwerte bzgl. PM_{10} und $PM_{2,5}$ lediglich als grobe physikalische Fixierungen zu sehen, während ihre Relevanz bzgl. Schutz der menschlichen Gesundheit ein weites Forschungsfeld eröffnet.

Vor der eigentlichen gravimetrischen Filter-Messung erfolgt bei den heute verwendeten Instrumenten eine Vorabscheidung großer Partikel ($d_{ae} > 15\mu m$) durch Impaktoren oder Zyklone, was das o.g. Problem der Dominanz großer und schwerer Partikel etwas verringert. Impaktoren absorbieren die großen Staupartikel durch Aufprall auf eine Platte, die kleine/ leichte Partikel des Luftstroms wegen ihrer geringeren Trägheit umfliegen. Zyklone nutzen die zur Masse proportionalen Zentrifugalkräfte während der Rotation, um Partikel verschiedener Größenklassen zu trennen.

In den USA wurde die bis dahin geltende amerikanische PM_{10} Richtlinie bereits 1997 um Grenzwerte für die lungengängige Fraktion $PM_{2,5}$ ergänzt, die EU und Deutschland folgten erst im Jahr 2015, d.h. 13 Jahre später als die USA.

Ultrafeine Partikel (UFP) mit aerodynamischem Durchmesser $d_{ae} < 0.1\mu m$ stellen in mehrfacher Hinsicht ein besonderes Problem dar. Ihr diffusives Verhalten kann nicht mit dem o.g. Stokes-Regime beschrieben werden. Ähnlich den Luftmolekülen folgen sie der

⁶⁵ Abscheidegrad von 50% für Partikel $d = 10\mu m$

Brown'schen Molekularbewegung. Sie passieren den Filter oder werden durch Adhäsion an den Fasern des Filters aufgefangen. Ihr Anteil am Gewicht des im Filter aufgefangenen Staubes ist um 2 bis 3 Potenzen geringer als das der anderen Staubfraktionen und wird trotz ihrer Relevanz in Bezug auf ihre große Gesamtoberfläche und die damit verbundene Wirkung auf die menschliche Gesundheit mit der gravimetrischen Methode quasi nicht erfasst.

Für Ultrafeinstaub ($d_{ae} < 0.1 \mu\text{m}$) existiert bisher kein Kriterium zur Beschreibung seiner gesundheitlichen Relevanz. Hierzu benötigt es zunächst den Ort seiner Ablagerung im menschlichen Atemtrakt, die Eigenschaften der Partikel in Abhängigkeit von ihrer Größe, die Rate, mit der die eingeatmeten Partikel im menschlichen Organismus zirkulieren bzw. darüber, ob und in welchem Anteil eingeatmete ultrafeine Partikel wieder abgeschieden oder im Körper akkumuliert werden.

7 Regionale Verteilung von Pflegeheimen im städtischen Bereich

Die in Kapitel 5 genannten Mängel spielen insbesondere in den bekannten Risikogruppen der Bevölkerung eine große Rolle. Menschen mit Vorerkrankungen und/ oder fortgeschrittenem Alter sind von Luftbelastungen erheblich stärker betroffen als die "Normalbevölkerung". Insofern ist die Lage von Pflegeheimen insbesondere in Großstädten von erheblicher Bedeutung.

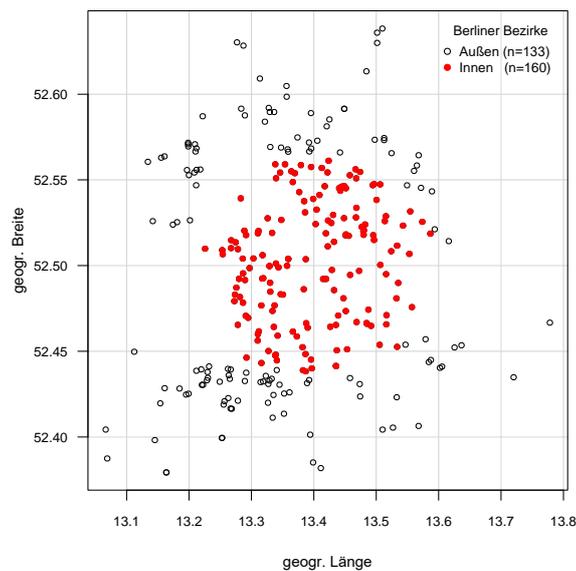


Abbildung 10: Geografische Lage der Berliner Pflegeheime 2021

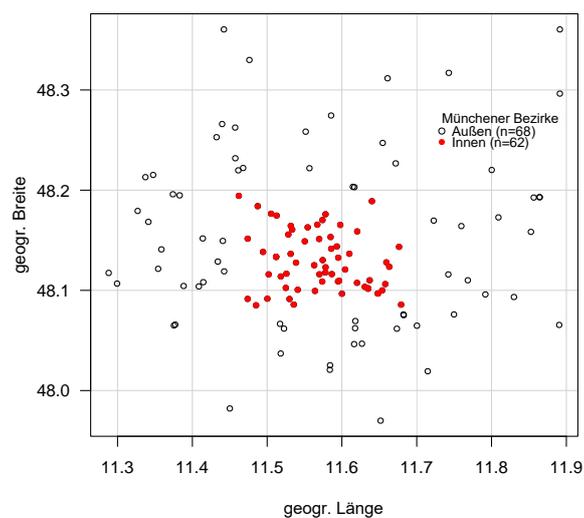


Abbildung 11: Geografische Lage der Münchener Pflegeheime 2021

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen den Unterschied der Luftbelastungen durch $PM_{2.5}$ zwischen einer zentralen und einer Randlage jeweils für Berlin bzw. München. Für den Vergleich wurden jeweils zwei städtische Messstellen gewählt, die Innen- bzw. Außenbezirke desselben Tages repräsentieren. In Berlin wird eine Station im städtischen Hintergrund (Buch) mit einer im vorstädtischen Hintergrund (Neukölln) verglichen, während für München, das eine geringere Flächenausdehnung hat, ein Vergleich zwischen einer städtischen Verkehrslage (Landshuter Allee) mit einer im ländlichen Hintergrund (Andechs) herangezogen wird.

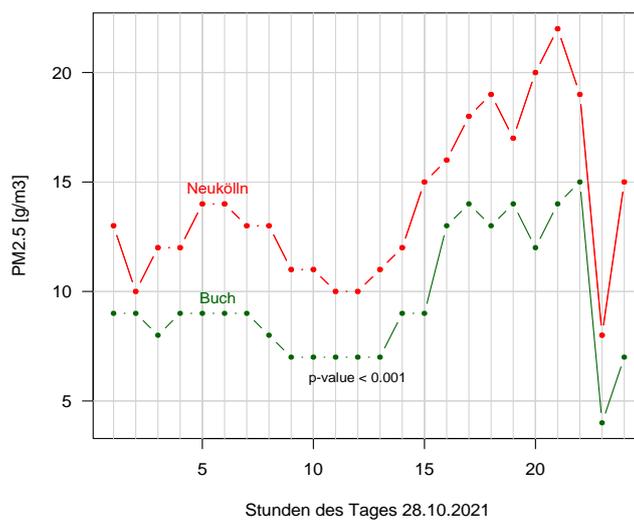


Abbildung 12: Feinstaubbelastung eines Tages an verschiedenen Messstationen Berlins

Die Tagesganglinien der $PM_{2.5}$ -Werte in Berlin Neukölln und Buch verlaufen nahezu parallel mit einem signifikanten Unterschied von nahezu $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Während die Werte in der Stadtrandlage Buch $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht überschreiten, steigen sie in Neukölln auf bis zu $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

In München sieht der Vergleich zum ländlichen Hintergrund in Andechs deutlich dramatischer aus: Die mit dem Berufsverkehr zwischen 15 - $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ schwankenden Feinstaubwerte stehen Werten in Andechs gegenüber, die im gesamten Tagesverlauf nicht über $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ steigen.

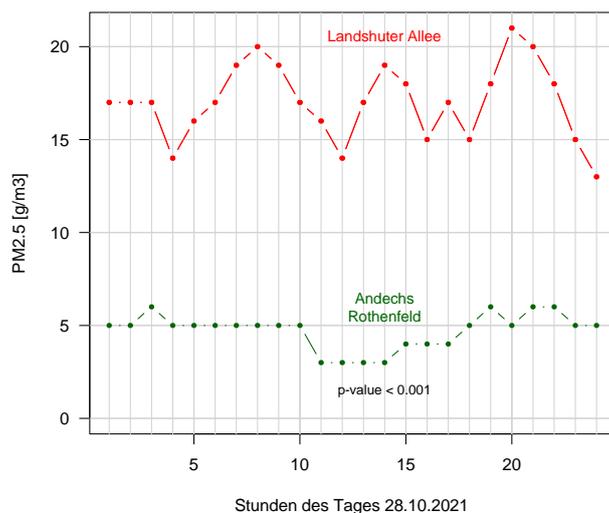


Abbildung 13: Feinstaubbelastung eines Tages an zwei Messstationen Münchens

Angesichts der großen Zahl einschlägiger Studien gilt die probabilistische Kausalität gesundheitlich relevanter Auswirkungen von Luftbelastungen durch Feinstaub auch in der breiten Öffentlichkeit als evident. Dabei sind gerade altersbedingte Krankheiten stark mit Feinstaub in der Atemluft assoziiert. Schon im Jahr 2004 kam die American Heart Association zu dem Schluss, dass auch bereits kurzfristige Expositionen gegenüber Feinstaub u.a. zu signifikant vermehrten Krankenhauseinweisungen wegen Herz-Kreislauf und kardiovaskulären Erkrankungen führen⁶⁶. Ähnliche Ergebnisse lieferte die o.g. Studie von Linares, C. und Diaz, J. (s. Abbildung 4, S. 18), nach der die Anzahl der Klinikeinweisungen wegen Herzinfarkt auch bei kurzfristiger Zunahme von PM_{2,5} signifikant ansteigen.

Auch der Zusammenhang zwischen Feinstaubbelastung und Diabetes wird auf Basis verschiedener Studien als sehr wahrscheinlich angenommen. Eine Studie aus Taiwan⁶⁷ ergab eine Zunahme der Häufigkeit von Diabetes um 24% bei Anstieg einer PM_{2,5}-Belastung um 10 µg/m³ für die Dauer von 3 Jahren. Eine aktuelle, kanadische Studie⁶⁸

⁶⁶ BROOK, Robert D, FRANKLIN, Barry, CASCIO, Wayne, HONG, Yuling, HOWARD, George, LIPSETT, Michael, LUEPKER, Russell, MITTLEMAN, Murray, SAMET, Jonathan & SMITH JR, Sidney C 2004. *Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association*. *Circulation*, 109, 2655-2671.

⁶⁷ LIN, Po-Hsiu, CHEN, Mu-Jean, PAN, Wen-Chi, WU, Chih-Da & SU, Huey-Jen. 2014. *Association between Long-Term Exposures of Fine Particulate Matter and Type 2 Diabetes in Taiwan* [Online]. Verfügbar unter: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/abs/10.1289/isee.2014.P3-729> [Abgerufen am 16.12.2021].

⁶⁸ BROOK, Robert D., CAKMAK, Sabit, TURNER, Michelle C., BROOK, Jeffrey R., CROUSE, Dan L., PETERS, Paul A., VAN DONKELAAR, Aaron, VILLENEUVE, Paul J., BRION, Orly, JERRETT, Michael, MARTIN, Randall V., RAJAGOPALAN, Sanjay, GOLDBERG, Mark S., POPE, C. Arden & BURNETT, Richard T. 2013. *Long-Term Fine Particulate Matter Exposure and Mortality From Diabetes in Canada*. *Diabetes Care*, 36, 3313-3320.

zeigt, dass bei langfristiger PM_{2,5}-Exposition und Konzentrationen auch unter 5 µg/m³ ein signifikant erhöhtes Sterberisiko wegen Diabetes besteht. Eine Erhöhung der PM_{2,5}-Belastung um 10 µg/m³ ist nach dieser Studie mit einem Anstieg des Risikos diabetesbedingter Mortalität von bis zu 49% verbunden.

Eine weitere Herausforderung des öffentlichen Gesundheitswesens bei weiterhin steigender Lebenserwartung der Bevölkerung stellt die durch Feinstaub verursachte Zunahme neurodegenerativer Erkrankungen dar.

Rachel et. al. konnten in ihrer Studie "Fine Particulate Matter and Dementia in the Adult Changes in Thought Study"⁶⁹ zeigen, dass bereits geringe Zunahmen von PM_{2,5} einen signifikanten Anstieg der Fälle von neurodegenerativen Erkrankungen insbesondere bei der älteren Bevölkerung auch kurzfristig zur Folge haben:

Aus Daten von 1978 bis 2018 der US-amerikanischen Stadt Seattle ergab sich, dass bereits eine Zunahme von PM_{2,5} um 1 µg/m³ bei einem 10-Jahres-Niveau von 10 µg/m³ das Demenz-Risiko um 16 Prozent erhöht. Nach den Ergebnissen dieser Studie ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Teil der überwiegend in der älteren Bevölkerung Deutschlands beobachteten Demenz-Prävalenz⁷⁰ in Höhe von 7% und deren Zunahme um jährlich 330.000 Fälle der Wirkung von Feinstaub der Kategorie PM_{2,5} zuzurechnen und bei zunehmender Lebenserwartung künftig sogar steigend zu erwarten ist.

Vor dem Hintergrund dieser und ähnlicher Forschungsergebnisse erweist sich die Lokalisation der Pflegeheime in den deutschen Großstädten als wesentlich. Wie Abbildung 10 und 11 exemplarisch für Berlin und München zeigen, befinden sich in beiden Städten etwa 60% der Pflegeheime in den Innenstadtbezirken, wo deren Bewohner deutlich höheren Feinstaubbelastungen ausgesetzt sind. Es ist davon auszugehen, dass diese Beobachtung analog auch für andere Städte gilt.

Die steigende Anzahl Pflegebedürftiger der beiden letzten Jahrzehnte veranschaulicht den Aufwand der Gesundheits- und Pflegeeinrichtungen. Nach Angaben des Statistischen Bundesamts versorgten im Jahr 2019 insgesamt 15.380 Deutsche Pflegeheime

⁶⁹ SHAFFER, Rachel M, BLANCO, Magali, LI, Ge, ADAR, Sara D, CARONE, Marco, SZPIRO, Adam, KAUFMAN, Joel D, LARSON, Tim, LARSON, Eric B & CRANE, Paul. 2020. *Fine Particulate Matter and Dementia in the Adult Changes in Thought Study* [Online]. Environmental Health Perspectives. Verfügbar unter: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3678619> [Abgerufen am 16.12.2021].

⁷⁰ DEUTSCHE ALZHEIMER GESELLSCHAFT. 2020. *Anzahl der Demenzkranken in Deutschland nach Alter und Geschlecht im Jahr 2018 (in 1.000)* [Online]. Heidelberg: Statista GmbH. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246028/umfrage/anzahl-der-demenzkranken-in-deutschland-nach-alter-und-geschlecht/> [Abgerufen am 08.08.2021].

und 14.688 ambulante Pflegedienste bereits 4,13 Millionen Pflegebedürftige, 731.000 davon in Pflegeheimen. Wie Abbildung 14 zeigt, nimmt die Anzahl Pflegebedürftiger insgesamt zu und wird für das Jahr 2060 bei sigmoidalem Verlauf auf 4,53 Mio. geschätzt.

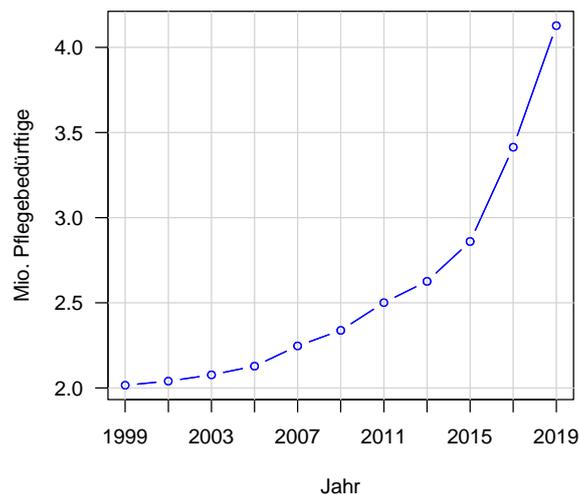


Abbildung 14: Anzahl pflegebedürftiger Personen in Deutschland⁷¹

Bei den heute 80- bis 85-jährigen ist bereits jede vierte Person pflegebedürftig und es ist zu erwarten, dass Quote und Volumen mit steigender Lebenserwartung weiter ansteigen werden. Für den Geburtsjahrgang 2060 schätzt das Statistische Bundesamt aktuell einen Anstieg der Lebenserwartung in Deutschland auf 84/ 88 Jahre⁷². Unter der Annahme zumindest nicht fallender Quoten der Pflegebedürftigkeit ist unter gleichen Umständen ein entsprechender Anstieg der Zahl der zu pflegenden Personen zu erwarten.

In der 1982 von Reisberg, et.al. entwickelten 7-stufigen Skala *The Global Deterioration Scale for assessment of primary degenerative dementia*⁷³ stellt sich die Verteilung der

⁷¹ Eigene Grafik in Anlehnung an: STATISTISCHES BUNDESAMT. 2020. *Anzahl der Pflegebedürftigen in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2019 (in 1.000)* [Online]. Wiesbaden: Statista GmbH. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2722/umfrage/pflegebeduerftige-in-deutschland-seit-1999/> [Abgerufen am 04. August 2021]. Schätzung für 2060 im Kommentar.

⁷² STATISTISCHES BUNDESAMT. 2021b. *Entwicklung der Lebenserwartung bei Geburt in Deutschland nach Geschlecht in den Jahren von 1950 bis 2060 (in Jahren)* [Online]. Heidelberg: Statista. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/273406/umfrage/entwicklung-der-lebenserwartung-bei-geburt--in-deutschland-nach-geschlecht/> [Abgerufen am 7.8.21 2021].

⁷³ Global Deterioration Scale (GDS)

kognitiven Ausstattung der Heimbewohner in heutigen Pflegeheimen Deutschlands etwa folgendermaßen dar⁷⁴:

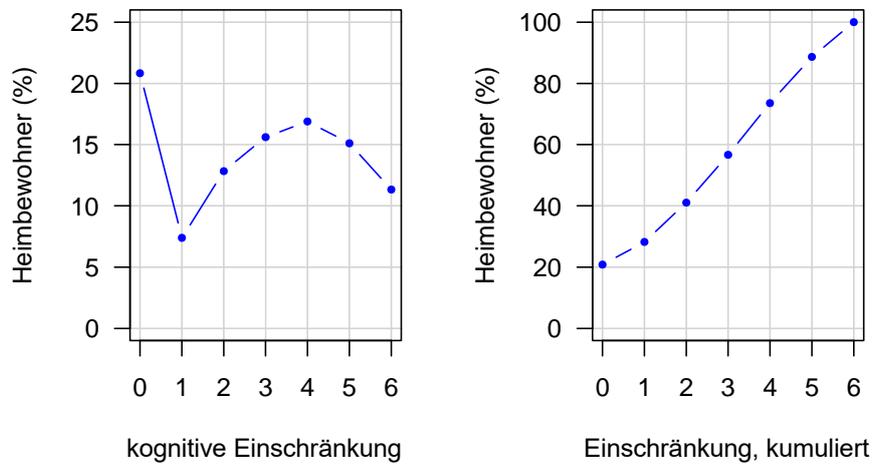


Abbildung 15: Kognitive Einschränkungen bei Heimbewohnern in Deutschland

Nur etwa 20% der Heimbewohner sind gänzlich ohne kognitive Einschränkungen, während bei nahezu 40% mindestens die Stufe 3 und bei 30% die in der Pflege bereits sehr bedeutsamen Stufen 4 bis 6 diagnostiziert wurden.

Der zusätzliche Pflegeaufwand bei kognitiv eingeschränkten Patienten stellt in der Pflegepraxis pflegerisch und wirtschaftlich ein erhebliches Problem dar.

Bevölkerungsschätzung 2018-2060 Alter > 65: Anzahl / Demenz in Mio.				
Jahr	G3L1W3		G1L3W1	
	Anzahl	Demenz	Anzahl	Demenz
2018	17,87	1,53	17,87	1,53
2020	18,28	1,59	18,30	1,59
2030	21,42	1,83	21,85	1,92
2040	22,57	2,09	23,71	2,31
2050	22,15	2,35	23,98	2,78
2060	22,23	2,31	24,32	2,92

Tabelle 5: Prävalenzschätzung Demenz in Deutschland nach zwei Modellen⁷⁵

⁷⁴ Erhebungen der "Klinik für Geriatrie und Altersmedizin", PD.Dr.Lahmann, Charité Berlin

⁷⁵ DEUTSCHE ALZHEIMER GESELLSCHAFT E.V. 2020. *Informationsblatt 1: Die Häufigkeit von Demenzerkrankungen*, Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V.

Die 2018 veröffentlichte Studie *“The impact of exposure to air pollution on cognitive performance”*⁷⁶ der Pekinger Sozialwissenschaftler liefert zweifellos die derzeit fundiertesten Antworten auf die Frage, ob und in welchem Umfang Luftbelastungen auch kognitive Fähigkeiten der Menschen signifikant beeinflussen.

Grundlage hierfür sind die Daten der jährlich aktualisierten *“China Family Panel Studies” (CFPS)*, durch die eine statistisch gesicherte, quantitative Identifizierung der Luftbelastung als ‚attributable risk‘ hinsichtlich kognitiver Fähigkeiten der Menschen bestimmt werden konnte. Das CFPS Panel führt jährlich in einer festen Stichprobe von etwa 30.000 repräsentativ ausgewählten Personen aus 1600 Familien Chinas u.a. Tests bezüglich kognitiver Fähigkeiten durch und korreliert diese mit den Messungen der lokalen Luftbelastungen⁷⁷, um lang- und kurzfristige Wirkungen der Exposition gegenüber Luftverschmutzungen auf die kognitiven Fähigkeiten der Personen im Laufe der Zeit zu modellieren.

Die statistisch gesicherten Ergebnisse des CFPS Panels lauten:

- Feinstaub wirkt signifikant negativ auf die verbale Kompetenz der Menschen.
- Dieser Effekt nimmt mit der Dauer der Exposition bei jeder Belastung signifikant zu.
- Der Effekt nimmt nur bei den Männern altersbedingt signifikant zu.
- Der Effekt ist bei gebildeten Männern signifikant geringer als bei weniger gebildeten.

Hinsichtlich Lage der Pflegeheime in den Großstädten ist das Ergebnis der chinesischen Untersuchung, wonach Luftverschmutzung auch bei ‚moderaten‘ Werten eine signifikante Reduktion der kognitiven Leistungsfähigkeit insbesondere des alternden Gehirns verursacht, von erheblicher Bedeutung.

Im Zuge des Übergangs von den bisherigen Pflegestufen zu den Pflegegraden wurden bereits Patienten mit mittlerer Demenz grundsätzlich 2 Grade höher eingestuft als ohne Demenz, was den erhöhten Pflegeaufwand deutlich beschreibt und Demenzkranke körperlich beeinträchtigten Pflegebedürftigen gleichgestellt.

⁷⁶ ZHANG, Xin, CHEN, Xi & ZHANG, Xiaobo 2018. *The impact of exposure to air pollution on cognitive performance*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115, 9193-9197.

⁷⁷ PEKING UNIVERSITY. o.J. *Institute of Social Science Survey: China Family Panel Studies* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.isss.pku.edu.cn/cfps/en/> [Abgerufen am 30.11.2021].

8 Wirkung und Alternativen

8.1 Toxische Emissionen implizieren Immissionen giftiger Aerosole

Abweichend von den bisherigen Betrachtungen bezüglich Immissionen erfolgt hier ein Exkurs über Toxizität der Emissionen als der primären Ursache von belasteten Immissionen am Beispiel des PKW-Verkehrs. Unter den in der 39. BImSchV nicht berücksichtigten Merkmalen von Feinstaub in der Atemluft spielt naturgemäß dessen Toxizität eine große Rolle.

Einige toxikologische und epidemiologische Studien zeigten, dass nicht nur die Partikelmassen- sondern für auch die Partikelanzahlkonzentration des Feinstaubes für einige gesundheitliche Effekte von Bedeutung ist. Hierzu zählen Studien von Pekannen et al. (1997), Penttinen et al. (2001), Peters et al. (1997a, 1997b) und von Klot et al. (2002), in denen die Beziehung zwischen ultrafeinen Partikelkonzentrationen (UFP) und aversiven Atemwegserkrankungen sowie kardiovaskulären Effekten festgestellt wurde. Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für die erste europäische Norm bzgl. Anzahlkonzentrationen von Autoabgasen (Euro 5, 2007)⁷⁸.

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der 2016 publizierte EMPA Studie GasOMep⁷⁹, in der die Emissionen von 7 GDI-PKW verschiedener Generationen mit einem Peugeot 4008 Diesel (Baujahr 2013, Abgasnorm Euro 5b) nach dem Zyklus WLTP⁸⁰ verglichen wurden.

Im Gegensatz zu den auf reinen Mengenangaben basierenden Immissionswerten der 39. BImSchV, haben die Forscher der EMPA für die Schätzung der durch PKW verursachten Emissionen hier die Toxizität der durch Verbrennungsmotoren eingetragenen Luftbelastungen als Zielgröße verwendet.

⁷⁸ Vgl. ASBACH, Christof , BALTENSPERGER, Urs, BRUCKMANN, Peter , BUILTJES, Peter J. H. , DESPRÉS, Viviane , DIEGMANN, Volker , DOPP, Elke , EBEL, Adolf & EIKMANN, Thomas 2010. *Statuspapier Feinstaub*, Frankfurt am Main, GDCh-/ KRdL-/ ProcessNet-Gemeinschaftsausschuss 'Feinstäube'. S. 15.

⁷⁹ COMTE, P., CZERWINSKI, J., KELLER, A., KUMAR, N., MUÑOZ, M., PIEBER, S., PRÉVÔT, A., WICHSER, A. & HEEB, N. 2018. *GASOMEPE: Current Status and New Concepts of Gasoline Vehicle Emission Control for Organic, Metallic and Particulate Non-Legislative Pollutants*, Dübendorf, Empa - Materials Science and Technology.

⁸⁰ Worldwide Light-Duty Vehicles Test Procedure

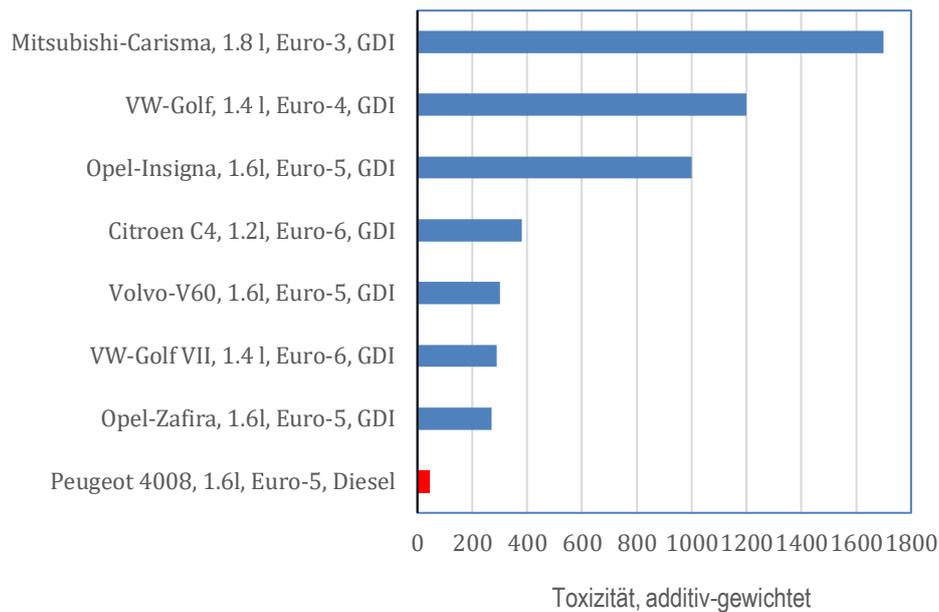


Abbildung 16: Toxizität Luftbelastung; Vergleich GDI-Diesel⁸¹

In Definition und Skalierung der 'Toxizität' gingen Naphthalin (0.001x)⁸², Chrysen (0.01x), Benzo(b)fluoranthen (0.1x), Indeno(1,2,3,-cd)pyren (0.1x), Benzo(a)anthracen (0.1x), Benzo(k)fluoranthen (0.1x), Benzo(b)anthracen (1x), Dibenz(a,h)anthracen (1x) gewichtet mit dem Grad ihrer individuellen Toxizität in die Zielgröße ein. Die gesundheitliche Relevanz dieser an Ruß gebundenen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) ist schon seit den 1970er Jahren bekannt, hat aber seither keine Berücksichtigung in die gesetzlichen Normen gefunden, die lediglich Grenzwerte für das Gewicht von Feinstaub begrenzen.

Abbildung 16 zeigt den Vergleich der Toxizität der Emissionen eines 2018 in Verkehr gebrachten Diesel-Fahrzeugs der Generation Euro-5 mit den GDI-Fahrzeugen⁸³ der Baujahre 2001 bis 2016. Letztere, Benzin betriebene PKW stießen genotoxische Abgase aus, deren Krebspotential bis zu 17-mal höher war als bei den Abgasen des untersuchten Diesel-Fahrzeugs.

⁸¹ Grafik und additive Gewichtung acht verschiedener Schadstoffe entsprechend ihrer Toxizitätsfaktoren in Anlehnung an COMTE, P., CZERWINSKI, J., KELLER, A., KUMAR, N., MUÑOZ, M., PIEBER, S., PRÉVÔT, A., WICHSER, A. & HEEB, N. 2018. *GASOMEP: Current Status and New Concepts of Gasoline Vehicle Emission Control for Organic, Metallic and Particulate Non-Legislative Pollutants*, Dübendorf, Empa - Materials Science and Technology. S.25.

⁸² in Klammern die relative Toxizität

⁸³ GDI: Gasoline Direct Injection, sog. Direkteinspritzer

Für das Jahr 2020 wurde der Anteil von Direkteinspritzern an Neufahrzeugen in Europa auf ein Drittel geschätzt⁸⁴. Ihren Erfolg verdankt die GDI Technologie einer deutlich erhöhten Motorenleistung bei gleichem Hubraum und Verbrauch. Die gesundheitliche Gefährdung durch GDI-Benziner - auch der aktuellen Modellreihen - ist deutlich höher als jene von Diesel-Autos, die seit Euro-5 (2009/11) mit einem Partikelfilter ausgerüstet sind.

In der EU-Richtlinie 2004/107/EG wurde für die Konzentration von Benzo(a)pyren in der Umgebungsluft ein 'Zielwert' von 1 ng/m³ angegeben. In der 39. BImSchV ist der Begriff 'Zielwert' in großer Beliebigkeit folgendermaßen definiert:

„Zielwert“ ist ein Wert, der mit dem Ziel festgelegt wird, schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt insgesamt zu vermeiden, zu verhindern oder zu verringern, und der nach Möglichkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums eingehalten werden muss (Teil 1, §1, 37).

Unter (3) der Präambel der o.g. EU-Richtlinie wird ohne ersichtlichen Grund aber in voller Absicht potenziellen Verursachern dieser Luftbelastungen der Weg für eine nach dem Verursacherprinzip eigentliche erforderliche Haftung gewiesen:

Aus Gründen der Kostenwirksamkeit ist es in bestimmten Gebieten nicht möglich, Immissionskonzentrationen von Arsen, Cadmium, Nickel und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen zu erreichen, von denen kein signifikantes Risiko für die menschliche Gesundheit ausgeht (Präambel, Gründe, 3).

In GDI-Abgasen der EMPA-Studie lag die Konzentration von Benzo(a)pyren im gesetzlichen Zyklus (WLTC) zwischen 8 und 2600 µg/m³. Ein Kubikmeter Abgas erreicht diesen Zielwert hiernach frühestens nach Durchmischung mit 2600 m³ vollkommen reiner Luft, eine Menge sauberer Luft, die bei dichtem Verkehr nicht immer zur Verfügung steht.

Seit 1. Januar 2021 müssen alle neu zugelassenen Pkw die letzte Abgasnorm der Reihe Euro 6 (Euro 6d-ISC-FCM) erfüllen, wodurch inzwischen auch die Abweichung zwischen dem Typzulassungswert und realem Verbrauch kontrolliert wird. Es gibt bislang aber keine Vorschrift für den Einbau entsprechender Filter bei bereits zugelassenen Fahrzeugen, obwohl diese technisch ausgereift sind und in finanziell vertretbarem Rahmen von der Industrie angeboten werden. Eine Senkung der heute gemessenen Partikeldichten um 90 Prozent ist allerdings technisch nur bei Verwendung der derzeit bestmöglichen Filtertechnologie möglich.

⁸⁴ DEUTSCHLANDFUNK. 2017. *Direkteinspritzer stoßen immer mehr Feinstaub und Krebsgifte aus* [Online]. Köln: Deutschlandfunk. Verfügbar unter: https://www.deutschlandfunk.de/dreckige-benziner-direkteinspritzer-stossen-immer-mehr.676.de.html?dram:article_id=386764 [Abgerufen am 06.10.2021].

8.2 Physiologische Wirkung von Feinstaub in der Atemluft

Die gesetzlich festgelegte, ausschließlich gravimetrische Kontrolle der Luftbelastungen verhindert den Einsatz der seit geraumer Zeit verfügbaren technischen Möglichkeiten zur differenzierten Messung verschiedener Eigenschaften des Staubs. Sie enthält insbesondere weder eine differenzierte Beurteilung hinsichtlich der Physiologie des atmen- den Menschen noch hinsichtlich der sich ergebenden Relation von ein- und ausgeat- mter Luft.

Die folgende Abbildung 17 veranschaulicht die Eindringtiefe von Staubpartikeln ver- schiedener Partikelgröße in die Regionen des menschlichen Atemtrakts.

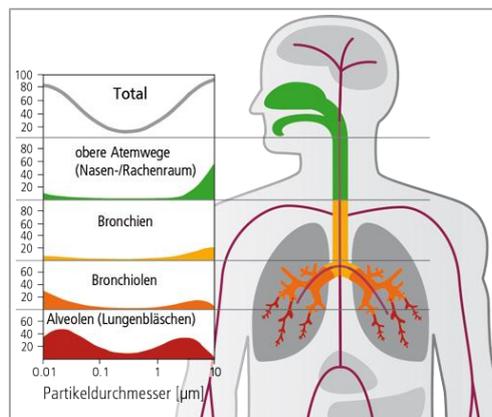


Abbildung 17: Eindringtiefe Feinstaub nach Partikelgröße (%)⁸⁵

In welche Regionen des Atemtrakts eingeatmete Partikel gelangen, hängt wesentlich von den Parametern Größe und Form ab, die durch den fiktiven aerodynamischen Durchmesser jedoch nicht abgebildet werden. Die folgende Tabelle 6 zeigt die Regionen des menschlichen Atemtrakts, in die Staubpartikel in Anhängigkeit von ‚Größe und Form‘ gelangen und benennt die zugehörigen PSS-Kriterien⁸⁶.

⁸⁵ LUFTFILTERBAU GMBH. 2020. *ISO 16890: Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik* [Online]. Kiel: Luftfilterbau GmbH. Verfügbar unter: <http://www.iso16890.de/> [Abgerufen am 10.09.2020].

⁸⁶ Particle Size Selective

Ablagerung	PSS-Kriterium	Erkrankung
Exthorax, Nase, Rachen	inhalierbar, I(d _{ae}), N(d _{ae})	Nebenhöhlen, Rachen
Mund	inhalierbar, I(d _{ae})	Laryngitis
tracheobronchiale	thorakal, tracheobronchiale	Bronchitis, Asthma
alveolar	R(d _{ae}), A(d _{ae})	Alveolitis, Lungenödem, Emphysem
alveolar	Fasern, PCM definiert	Asbestose, Mesotheliom

Tabelle 6: Staubpartikel im menschlichen Atemtrakt⁸⁷

Bereits 1913 hatte McCrea⁸⁸ bei Untersuchungen von Lungen verstorbener Arbeiter in den Kohlebergwerken Südafrikas festgestellt, dass deren Alveolen mit Staubpartikeln der Größe $d \leq 7\mu$ stark belastet waren. Diese Beobachtung wurde erst 1952 - nahezu 40 Jahre nach den Untersuchungen von McCrea - in der ersten kontrollierten experimentellen Inhalationsstudie von Davies⁸⁹ bestätigt und wurde während der Internationalen Pneumokoniose-Konferenz 1959 in Johannesburg, Südafrika, von der internationalen Arbeitsschutzgemeinschaft als Johannesburg-Konvention allgemein anerkannt.

Die physiologische Wirksamkeit von Fremdstoffen im menschlichen Organismus hängt neben anderen Faktoren entscheidend von der Partikeloberfläche ab, über die Reaktionen zwischen Agens und Organismus erfolgen können. Wie die folgende Tabelle 7 zeigt, hat eine Anzahl von 10^6 ultrafeinen Partikel (0.1μ) dieselbe Masse wie ein einziges großes Partikel (10μ), verfügt aber über das Hundertfache an reaktiver Oberfläche.

	d _{ae} = 10 μ m	d _{ae} = 2.5 μ m	d _{ae} = 0.1 μ m
Masse gesamt	1	1	1
Anzahl Partikel	1	2 ⁶	10 ⁶
Oberfläche Partikel	1	6,25·10 ⁻²	10 ⁻⁴
Oberfläche gesamt	1	4	100

Tabelle 7: Masse vs. Oberfläche von Fein- und Ultrafeinstaub

⁸⁷ VINCENT, James H. 2007. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*, New York, John Wiley & Sons. S. 249, Formel 10.6.

⁸⁸ MCCRAE, John 1913. *The ash of silicotic lungs*, Johannesburg, South African Institute for Medical Research. Zitiert nach: VINCENT, James H. 2007. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*, New York, John Wiley & Sons. S. 286.

⁸⁹ DAVIES, C.N. 1952. *Dust sampling and lung disease*. British Journal of Industrial Medicine 120-126. Zitiert nach: VINCENT, James H. 2007. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*, New York, John Wiley & Sons. S. 286.

Die folgende Abbildung 18 zeigt diesen Zusammenhang für eine typische Größenverteilung des Staubs in der Außenluft⁹⁰:

- von ca. 2 Millionen Partikeln wurden nur 45 der 10 μm -Partikel⁹¹ beobachtet, die 44% des Gesamtgewichts aber nur 7% der biologisch relevanten Oberfläche besitzen.
- 1.9 Mill. der 0.1 μm -Partikel besitzen nur 1.9% des Gesamtgewichts aber 32.6% der biologisch relevanten Oberfläche.

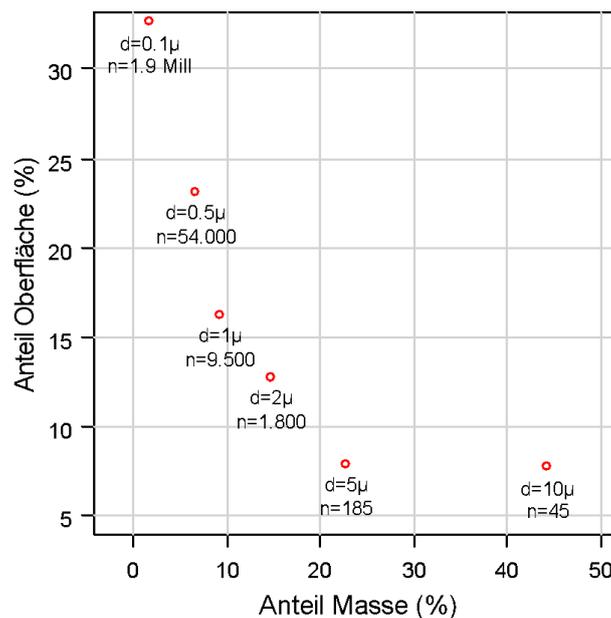


Abbildung 18: Relation Oberfläche-Masse bei Feinstaubpartikeln⁹²

Feine Partikel können problemlos in die Alveolen eindringen und je nach Toxizität gesundheitliche Schäden verursachen, ohne das Staubgewicht signifikant zu beeinflussen, während 10 μm -Partikel, die fast die Hälfte des Staubgewichts ausmachen, bereits in den oberen Atemwegen abgefangen werden.

Diese Diskrepanz zwischen Gewicht und Oberfläche unterschiedlich großer Partikel zeigt deutlich, dass sämtliche, auf dem Staubgewicht basierenden Grenz- und Zielwerte der 39. BImSchV bzgl. Feinstaub PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ auch bei gleicher Toxizität ohne die

⁹⁰ Eigene Konstruktion von Daten zur Veranschaulichung in Anlehnung an typische Staubverteilungen wie beispielsweise bei FLUKE DEUTSCHLAND GMBH 2012. *Einfaches Messen der Luftqualität in Innenräumen mit dem Partikelzähler Fluke 985*, Glottertal, Fluke Deutschland GmbH.

⁹¹ von etwa 2 Mio. Partikel

⁹² Ebd.

Berücksichtigung der realen Größenverteilung der Partikel Gefahr laufen, das wiederholt formulierte Ziel zum Schutz der menschlichen Gesundheit zu verfehlen.

Eine Durchsicht der diesbezüglich publizierten wissenschaftlichen Studien bestätigt diese Überlegung. Nahezu alle vorliegenden epidemiologischen Studien zum Thema Gesundheit/ Feinstaub haben gezeigt, dass die Prävalenzen der mit Feinstaubbelastung assoziierten Erkrankungen auch unterhalb der in der Richtlinie 2008/50/EG genannten und in der 39. BImSchV für Deutschland umgesetzten Grenzen signifikant erhöht sind.

Wenn ein Filter – zufallsbedingt – in einer Messphase nur eines der 10 µm-Partikel weniger abscheidet, dann könnte die 0.1 µm-Fraktion ohne Veränderung der Gesamtmasse um 10^6 Partikel zunehmen, ohne dass diese medizinisch bedeutsame Änderung von der gravimetrischen Methode registriert würde! Die gravimetrische Methode liefert für beide Szenarien das gleiche Gesamtgewicht ohne die erhebliche Vergrößerung der medizinisch relevanten Oberfläche von etwa 30.000 Einheiten zu berücksichtigen. Die in der 39. BImSchV formulierte Zielsetzung zum Schutz der menschlichen Gesundheit wird durch die gravimetrische Methode der Staubbmessung geradezu konterkariert.

Neben der Problematik, gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub nicht allein durch dessen Gewicht beschreiben zu können, spielen faserförmige Partikel sowohl bei der Abscheidung an einem Filter als auch in der menschlichen Atmung eine besondere Rolle. Im Gegensatz zu kompakten Partikeln stellen feine und ultrafeine Fasern (s. Abbildung 19) allein wegen ihrer Form ein besonderes Problem dar. Ihr thermodynamisches Verhalten entzieht sich der Beschreibung durch aerodynamische Durchmesser. Sie dringen bis in die Alveolen der menschlichen Atmung vor und können dort wegen ihrer Form von den Makrophagen nicht vollständig ummantelt und unschädlich gemacht werden und verbleiben somit erheblich länger als kompakte Partikel in den Alveolen.

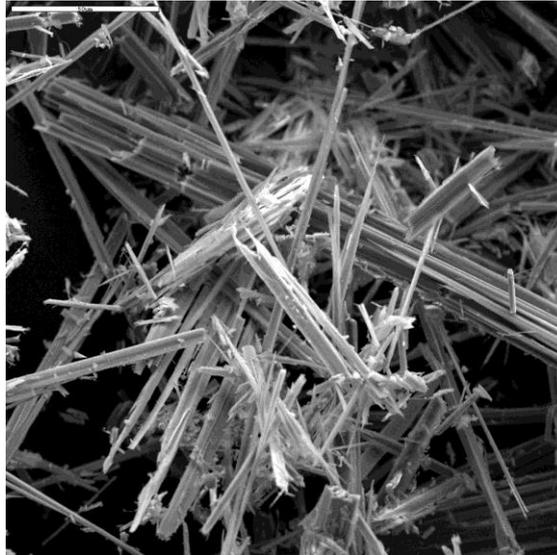


Abbildung 19: Anthophyllit Asbest (Maßstab o. li.: 50 µm)⁹³

Bereits in den frühen 1900er Jahren wurden negative gesundheitliche Wirkungen von Asbest vermutet und seit 1940 konnten Asbestfasern definitiv als Ursache von Tumoren in der Lunge identifiziert werden.

In den 1970er Jahren wurde Asbest wegen seiner positiven Eigenschaften massenhaft und in nahezu allen Bauten, in der Werftindustrie, für die Herstellung von Straßenbelägen und selbst zur Herstellung von Garnen für Textilien eingesetzt, was unmittelbar zu einer Exposition der Menschen gegenüber den Fasern des Asbests führte. Der Einsatz von Asbest ist in Deutschland seit 1993⁹⁴ generell verboten, nimmt aber z.B. in Russland, Indien, Brasilien und einigen Schwellenländern immer noch zu⁹⁵.

Asbestfasern haben in ihrer gesundheitlichen Wirkung eine große "Latenzzeit", d.h. die durch sie hervorgerufenen Tumore in der Lunge werden überwiegend erst 20 bis 30 Jahre nach Exposition manifest, was neben der Toxizität auch – und sogar dominant – eine Folge ihrer Geometrie ist, durch die diese über sehr lange Zeit in den Alveolen quasi steckenbleiben, deren Membran auf Dauer schädigen, die Lungenkapazität verringern bzw. Tumore hervorrufen⁹⁶.

⁹³ THE UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 1969. *Anthophyllite Asbestos* [Online]. Washington. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/media/images/anthophyllite-asbestos-0> [Abgerufen am 28.11.2020 2020].

⁹⁴ EU-weit seit 2005

⁹⁵ UMWELTBUNDESAMT. 2020b. *Asbest* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/asbest#undefined> [Abgerufen am 28.11.2020 2020].

⁹⁶ MAK-KOMMISSION 2002. *Faserstäube, anorganisch - MAK Value Documentation*, Bonn, DFG.

Asbestfasern und Fasern industriell hergestellter Materialien (Glaswolle, Steinwolle und andere Dämmstoffe) stellen gravimetrisch nur einen sehr kleinen Teil des Feinstaubes in der Außenluft dar und werden trotz ihres hochsignifikant gesundheitlichen Gefährdungspotenzials bei extrem geringem Gewicht - wie alle feinen und ultrafeinen Partikel - bei jeder gravimetrischen Messung des Staubs vollkommen ignoriert. Eine Lösung dieses Problems benötigte eine Methode, mit der faserförmige und kompakte Partikel getrennt und separat gemessen und beurteilt werden können. Bereits im Jahr 1979 konnten Liliendorf, et. al.⁹⁷ mit ihrem fibrous aerosol monitor (FAM) ein "direct-reading" Verfahren vorstellen, mit dem Fasern und nicht-faserige Partikel getrennt bestimmt und analysiert werden können.

8.3 Mathematische Modellierung des inhalierbaren Anteils von Feinstaub

In den 1970-iger Jahren begann man in der Aerosolforschung, Staubmessgeräte und den atmenden Menschen parallel zu sehen⁹⁸. Daraus ergab sich die Aufgabe, die komplexen Charakteristiken menschlicher Atmung empirisch zu bestimmen mit der Zielsetzung, Messgeräte für Staub so zu konstruieren, dass sie der Atmung des Menschen zumindest hinsichtlich der inhalierbaren Anteile entsprechen. Auf Basis der bis 1983 verfügbaren Daten von Ogden⁹⁹ modellierte die Internationale Organisation für Normung (ISO) den inhalierbaren Anteil I der menschlichen Atmung durch die Beziehung

$$(1) \quad I(d_{ae};ISO) = 1 - 0.15 \cdot [\log(1 + d_{ae})]^2 - 0.1 \cdot \log(1 + d_{ae})$$

während die American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)¹⁰⁰ 1985 folgende für $d_{ae} \leq 100 \mu\text{m}$ vereinfachte Funktion als Standard empfahl

$$(2) \quad I(d_{ae};ACGIH) = 0.5 \cdot [1 + \exp(-0.06 \cdot d_{ae})]$$

$I(d_{ae};ISO)$ und $I(d_{ae};ACGIH)$ sind in der folgenden Abbildung 20 dargestellt.

⁹⁷ LILIENFELD, Pedro, ELTERMAN, Paul B & BARON, Paul 1979. *Development of a prototype fibrous aerosol monitor*. American Industrial Hygiene Association Journal, 40, 270-282.

⁹⁸ OGDEN, T.L. & BIRKETT, J.L. 1977. The Human Head as a Dust Sampler. In: WALTON, W. H. (ed.) *Inhaled Particles*. Oxford: Pergamon Press.

⁹⁹ Ebd.

¹⁰⁰ Air Sampling Procedures, Committee of American Conference of Governmental Industrial Hygienists

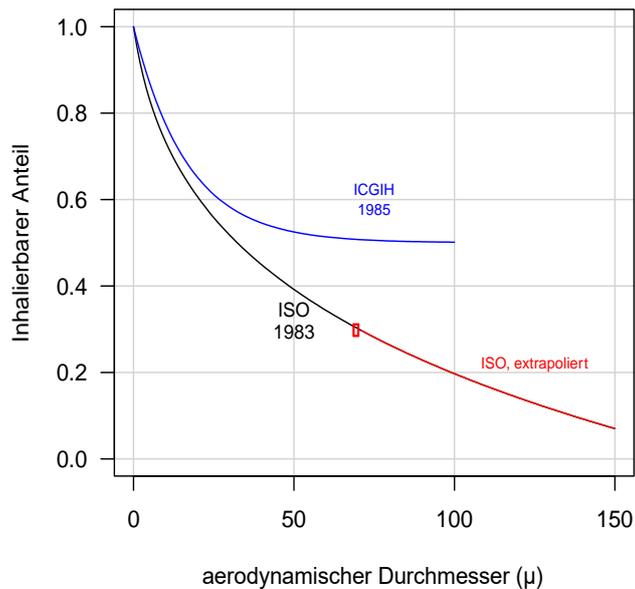


Abbildung 20: Inhalierbarer Anteil von Staubpartikeln nach Teilchengröße

Offenbar kommt die vereinfachte Darstellung des ACGIH im Bereich unter ca. 15 µm der Definition der ISO sehr nahe und weicht nur für die größeren Partikel stärker davon ab. Für aerodynamische Durchmesser >15 µm sinkt der inhalierbare Anteil bei ISO proportional schneller ab und geht über die Obergrenze von 100 µm der ACGIH hinaus.

Vincent et al.¹⁰¹ ergänzten den ACGIH-Ansatz durch einen Term bzgl. Windgeschwindigkeit v mit $1 \leq v \leq 9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ abhängigen rein empirisch bestimmten

$$(3) \quad I(d_{ae};\text{ACGIH}+) = 0.5 \cdot [1 + \exp(-0.06 \cdot d_{ae})] + 10^{-5} \cdot v \cdot 2.75 \cdot \exp(0.055 \cdot d_{ae})$$

Der additive Term kann für $v < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vernachlässigt werden, führt jedoch bei $v > 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zu einem erhöhten Anstieg des inhalierbaren Anteils, der bei $v \geq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bereits zu $I = 1$ ist. Die Form (3) wurde 1992 von der ISO als Kriterium übernommen, während das Comité Européen de Normalization (CEN) lediglich (2), d.h. die Version für geringe Windstärken als Standard akzeptierte.

¹⁰¹ VINCENT, J.H., MARK, D., MILLER, B.G., ARMBRUSTER, L. & OGDEN, T.L. 1990. *Aerosol inhalability at higher windspeeds*. Journal of Aerosol Science, 21, 577-586.

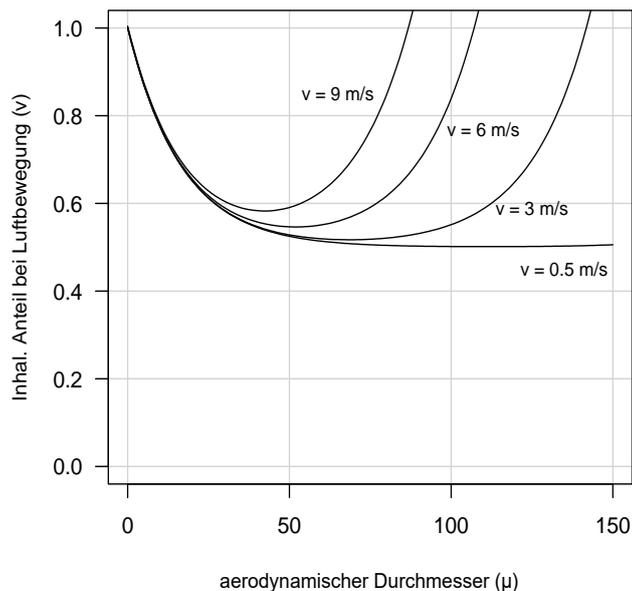


Abbildung 21: Staubpartikel, inhalierbarer Anteil vs. d_{ae} bei Luftbewegung

1987 entschied die EPA im Rahmen einer Überarbeitung der nationalen Luftqualitätsnormen für Feinstaub¹⁰² die Kenngröße TSP als Partikelindikator für die Primärstandards durch einen neuen Indikator zu ersetzen, der nur Partikel mit einem nominalen Durchmesser von weniger als 10 μm beinhaltet.¹⁰³ Dieser neu eingeführte "National Air Quality Standard for Particulate Matter" (PM_{10}) der EPA bildete die Grundlage für alle folgenden international akzeptierten Definitionen. Sowohl die europäische Richtlinie 2008/50/EG als auch die hier diskutierte 39. BImSchV bauen darauf auf und präzisieren darüber hinaus die Festlegung der PM_{10} Fraktion¹⁰⁴.

¹⁰² ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 1987. *Revisions to the national ambient air quality standards for particulate matter*. Federal Register, 52, 24634-69.

¹⁰³ Wortlaut im Original: "The Administrator ... has decided to replace TSP as the particle indicator for the primary standards with a new indicator that includes only those particles less than a nominal 10 μm in diameter, as specified in the Federal Reference Method being promulgated today."; ebd. S. 24639.

¹⁰⁴ PM_{10} sind Partikel, die einen gröÙenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometern einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist.

8.4 Zeitbezug Messtechniken für Feinstaub

Partikelgröße, Form, Gewicht, Chemie, Toxizität und Herkunft des Staubs in der Atemluft sowie Dauer der Exposition sind die maßgeblichen Faktoren für den Gesundheitsschutz. Dennoch beziehen sich die in der 39. BImSchV angegebenen Grenzwerte allein auf das über den Tag (PM₁₀) oder das Jahr (PM_{2,5}) gemittelte Gewicht des Staubs.

Angesichts der gut erforschten, kurzfristigen Wirkungen von Feinstaub der Kategorie PM_{2,5} erscheint deren Mittelung über das Kalenderjahr im Hinblick auf die Zielsetzung "zum Schutz der menschlichen Gesundheit" unverständlich.

Bereits 1934 wurde das erste "direct-reading" Instrument zur Feinstaubmessung vorgestellt¹⁰⁵. Die heute verfügbaren Instrumente zur direkten, non-invasiven und kontinuierlichen Messung von Feinstaub lassen sich entsprechend ihrer physikalischen Basis in die Kategorien optisch, elektrisch, molekular, mechanisch und nuklear unterteilen. Ihnen gemeinsam ist das Prinzip, die o.g. relevanten Parameter eines Aerosols non-invasiv zu messen, d.h. ohne den Staub an sich zu verändern, abzusondern etc.

Optische Messungen von Staubdichten basieren u.a. auf Reduktion bzw. Streuung des eingestrahlten Lichts, die durch

$$I = I_0 \cdot \exp(-c_p \cdot Q \cdot t)$$

beschrieben werden kann.

I₀ bzw. I bezeichnen die Intensitäten des eingestrahlten bzw. durch den Staub reduzierten Lichts. Flächendichte c_p, Koeffizient Lichtabschwächung Q sowie die Wegstrecke t des Lichts durch den Staub stellen Parameter der konkreten Konstruktion der Messvorrichtung dar, die geeignet kalibriert und bezüglich Staubdichte skaliert werden müssen. Staubmessungen durch diese Verfahren liefern – gänzlich anders als gravimetrische – Zeitreihen kontinuierlicher Daten, die je nach Zielsetzung digital übertragen und zentral statistisch verarbeitet werden können.

Staubmessungen durch Lichtschwächung bieten zusätzlich eine Möglichkeit der Überwachung weiträumiger Gebiete. Hierbei wird der Lichtdetektor entsprechend der Größe des Areals 0,5 bis 10 km von der Lichtquelle entfernt aufgestellt.

¹⁰⁵ DRINKER, Philip & HATCH, Theodore 1936. *Industrial Dust: Hygienic Significance*. Measurement and Control. New York, NY: McGraw-Hill International Book Co, 74.

Gegenüber der Staubmessung durch Schwächung eines Lichtstrahls liefern Messungen durch Lichtstreuung noch erheblich mehr Informationen über den Feinstaub. Mit der Lichtschwächung $S(\alpha)$ in Richtung¹⁰⁶ des Winkels α abweichend von der Richtung des eingestrahlten Lichts und die Apparatekonstante k ergibt sich für die Intensität I_α des Lichts in Richtung α

$$I_\alpha = I_0 \cdot k \cdot \frac{c_p \cdot S(\alpha)}{\sin \alpha}$$

Die bereits seit geraumer Zeit verfügbaren, intelligenten Instrumente für Staubmessungen durch Lichtstreuung bieten Möglichkeiten, die statistischen Verteilungen von Durchmesser, Oberflächen und u.U. auch die Herkunft der Staubpartikel ohne zeitliche Retardierung zu bestimmen und an eine dafür eingerichtete Zentrale zur Auswertung weiterzuleiten. Derzeit praktizierte gravimetrische Feinstaubmessungen durch Auffangen und Wägungen in Filtern stoßen neben ihres fehlenden Bezugs zur menschlichen Gesundheit auch gravimetrisch bei feinen und ultrafeinen Partikeln des Staubs ($d_{ae} < 100 \mu\text{m}$) an ihre Grenzen.

Eine umfassende Darstellung der heute möglichen Messtechniken für Feinstaub in der Atemluft würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit weit übersteigen¹⁰⁷. Ziel der kurzen Beschreibung war es jedoch anzudeuten, in welchem Umfang und welcher Vielfalt heute technisch ausgereifte und präzise Messtechniken vorliegen, die durch die gesetzlich verfügte, aber dramatisch defizitäre und in hohem Maße fehleranfällige gravimetrische Methode des Staubauffangens, Transports und Wägung nicht zum Zuge kommen. Die Anwendung der heute verfügbaren Möglichkeiten für ein Monitoring der Luftbelastung würde die ganz offensichtliche Lücke zwischen Staubbelastung und "Folgen für die menschliche Gesundheit"¹⁰⁸ erheblich verringern.

¹⁰⁶ Winkel abweichend von der Richtung des eingestrahlten Lichts

¹⁰⁷ Eine Stand 2007 umfassende Beschreibung findet man bei VINCENT, James H. 2007. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*, New York, John Wiley & Sons.

¹⁰⁸ Folgen, die in der 39. BImSchV immer wieder zitiert werden

9 Mediale und wissenschaftliche Resonanz, politische Bedeutung

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den exponentiellen Anstieg der internationalen Publikationen allein in Pub-Med zum Thema Luftbelastung seit Beginn der 80-iger Jahre insgesamt und in der Wochenzeitung DIE ZEIT¹⁰⁹. In dieser Zeitspanne sind 33.649 wissenschaftliche Publikationen und 512 Zeitungsartikel zum Thema erschienen¹¹⁰.

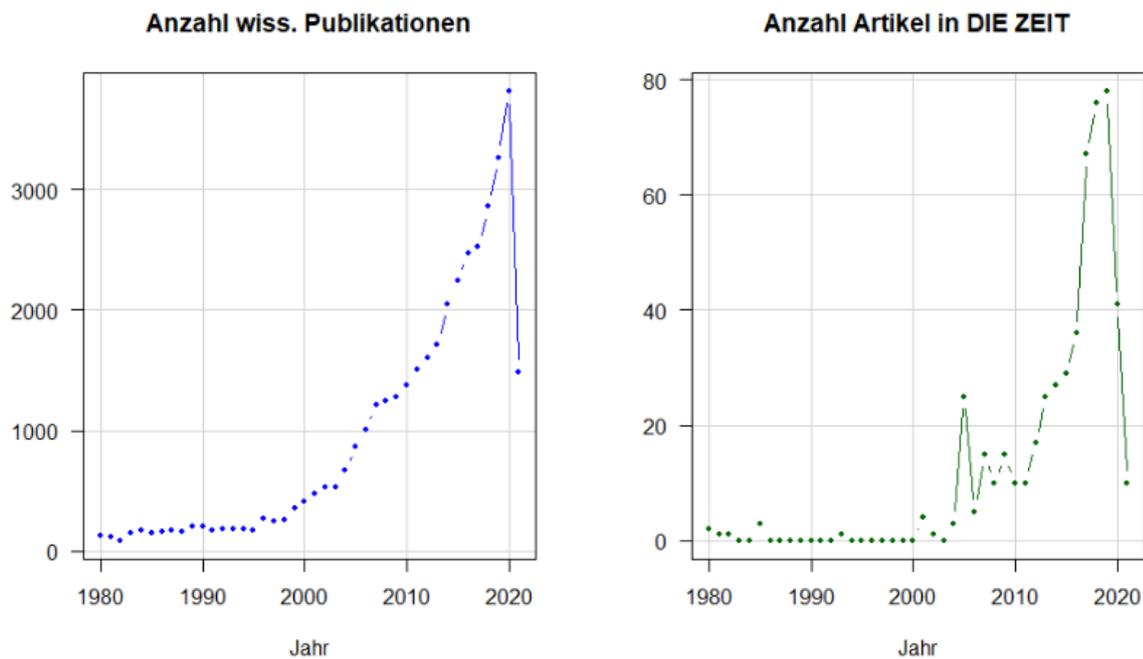


Abbildung 22: Wissenschaftliche Publikationen & Presseberichte, Suchbegriff „Particulate Matter“ bzw. „Feinstaub“

Wie der Vergleich zeigt, reagierten die Printmedien im Jahr 2001, d.h. relativ spät auf das, schon in den Vorjahren rege beforschte und nun offenbar nicht mehr abweisbare Thema. Bis heute stehen ca. 50 wissenschaftlichen Publikationen auf Pub-Med nur etwa einer Erwähnung in der Wochenzeitung DIE ZEIT gegenüber.

Ohne kritische Reflexion publiziert das Deutsche Umweltbundesamt (UBA) einen Rückgang der PM₁₀-Fraktion des Feinstaubs als Erfolgsgeschichte der Bemühungen für eine bessere Luft. Bis Ende 2018 befand sich die folgende Grafik in den Internet-

¹⁰⁹ ZEIT ONLINE GMBH. 2021. 512 Suchergebnisse für »Feinstaub« [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/2021/index> [Abgerufen am 12.05.2021]. Recherche zum Suchbegriff ‚Feinstaub‘.

¹¹⁰ Meta-Datenbank medizinischer Publikationen: US National Library of Medicine National Institutes of Health. Abgerufen am 12.05.2021 über <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>. Recherche zum Suchbegriff ‚Particulate Matter‘.

Auftritten des Umweltbundesamts und wurde dort ohne Umschweife als Beleg für die Abnahme der Feinstaubbelastung in den Jahren 1996 bis 2015 interpretiert.

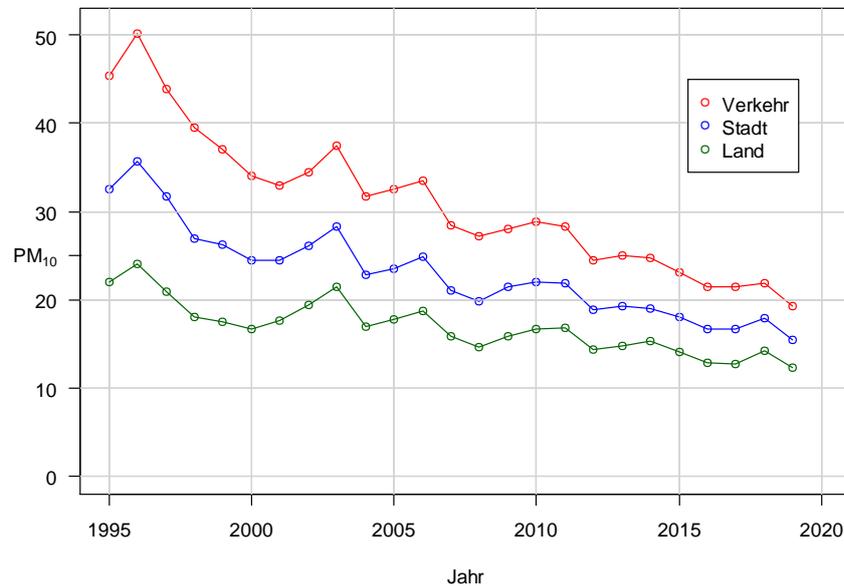


Abbildung 23: PM₁₀-Verlauf (Original: Feinstaub PM₁₀ – Jahresmittel 1996-2015)¹¹¹

Als Überschrift für die vorstehende Abbildung wurde im Original vom UBA der Terminus „Feinstaub PM₁₀ – Jahresmittel 1996 - 2015“ gewählt. Grafik und Titel erwecken den Eindruck, dass es sich beim Feinstaub – analog etwa zum Wasserverbrauch einer Stadt – um ein homogenes Gut handelt, dessen Reduktion allein durch Angabe der Menge/ Masse charakterisiert werden kann. In Anbetracht der gravimetrischen Methode der Feinstaubbestimmung trifft diese Interpretation jedoch nicht zu, denn Feinstäube unterscheiden sich neben anderen Merkmalen zunächst hinsichtlich der Größenverteilung ihrer Partikel (vgl. Kapitel 6.2). Der sogenannte aerodynamische Durchmesser (d_{ae}) der Partikel einer PM₁₀-Fraktion variiert vom sog. Ultrafeinstaub mit wenigen Nanometern bis zum seinem 1000-fachen mit der Folge extrem unterschiedlicher Eigenschaften und Bedeutung für die menschliche Gesundheit.

Die gesetzlichen Regelungen bezüglich der Fraktion PM₁₀ und die in Deutschland 2015 erfolgte bezüglich PM_{2,5} stellen allerdings keine scharfe Trennung/ Aufteilung der Immissionen bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm bzw. 2,5 µm dar.

¹¹¹ UMWELTBUNDESAMT. O.J. *Entwicklung der Luftqualität* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/entwicklung-der-luftqualitaet#entwicklung-der-luftqualitat-in-deutschland> [Abgerufen am 10.12.2018].

Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser bis 2,5 µm sind per definitionem sowohl Bestandteil von PM₁₀ als auch von PM_{2,5}. Bei größeren Partikeln wird ein gewisser Prozentsatz gewertet, der mit zunehmender Partikelgröße abnimmt und für PM₁₀ bei ca. 15 µm schließlich 0 % erreicht (vgl. Abbildung 9: Abscheidegrad in Trennfunktionen).

Während – wie oben ausgeführt - große Feinstaubpartikel bereits in weniger als einer Stunde aus einer Höhe von 10 m auf den Boden sinken, und damit, abgesehen von späteren Aufwirbelungen, für die menschliche Gesundheit ohne Bedeutung sind, benötigen die hochgefährlichen nano-Partikel für dieselbe Strecke bis zu 42 Tage (siehe Abbildung 8).

Das heißt, gerade die kleinsten und gesundheitlich bedeutsamen Partikel im Nano-Bereich verbleiben sehr lange in der Luft und sind wegen des regelmäßigen täglichen Nachschubs praktisch immer in hoher und eher steigender Konzentration vorhanden. Trotz ihres großen gesundheitlichen Gefahrenpotenzials tragen sie jedoch nur sehr wenig zum Gesamtgewicht bei. Insofern liegt die Vermutung nahe, dass sich der vom UBA publizierte Rückgang des Feinstaubes lediglich auf die erheblich größeren, aber gesundheitlich kaum bzw. weniger relevanten Partikel bezieht, die zudem durch zwischenzeitliche Änderungen der Emissionsnormen in den Industrieanlagen durch geeignete Filterverfahrenstechnisch reduziert werden konnten.

Neben dieser Schwäche liefert das derzeit praktizierte Verfahren der gravimetrischen Feinstaubbestimmung keinerlei Einschätzung der Bedeutung von Partikelgröße und Anzahl für die menschliche Gesundheit, wengleich die in der 39. BImSchV angegebenen Grenzwerte des Staubgewichts mit dem wiederholten Hinweis ‚zum Schutz der menschlichen Gesundheit‘ versehen sind.

9.1 Öffentliche Zweifel an der 39. BImSchV

Die öffentliche Debatte zum Thema ‚gesundheitsliche Folgen von Luftbelastung‘ ist durch eine extreme Polarisierung gekennzeichnet, in der zwei Lager versuchen, ihre Einstellung durch eine ‚wissenschaftliche‘ Basis bzw. deren Fehlen zu untermauern. Während ökologisch besorgte Protagonisten meinen, die gesundheitlichen Folgen seien durch sie ‚bewiesen‘, verweisen die Vertreter der Gegenposition darauf, dass insbesondere die in der 39. BImSchV festgelegten Grenzwerte ‚wissenschaftlich nicht bewiesen‘ seien.

Eine nähere Betrachtung zeigt jedoch, dass beide Lager wissenschaftliche Forschung auch da in Stellung zu bringen suchen, wo nicht diese, sondern gesellschaftlich-politische Entscheidungen jenseits der wissenschaftlichen Vorarbeiten maßgeblich sind (vgl. S. 28, Kap. 5.3).

Die in den Medien und andernorts stattfindenden Debatten zu Luftbelastungen sind naturgemäß nicht frei von den Interessen der jeweils Beteiligten bzw. Betroffenen. Anders jedoch als bei Debatten etwa über Ladenöffnungszeiten, Tempolimit auf Autobahnen, Mietpreisen, Kitagebühren etc., in denen alle Diskutanten weitgehend über dieselben Informationen verfügen, unterscheiden sich Debatten im Umfeld ökologischer Fragestellungen hiervon in mehrfacher Hinsicht.

Auseinandersetzungen über ökologische Themen fehlt der instantan wirksame Charakter einer allgemein akzeptierten kausalen Wenn-Dann Beziehung. Im Gegensatz etwa zu Mietern und Vermietern, denen die Folgen z.B. von Mieterhöhungen trotz entgegengesetzter Interessenlage genau bekannt sind, basieren die Argumente der Öko-Protagonisten lediglich auf probabilistischen Implikationen mit vergleichsweise geringerer Sicherheit. Nicht eingetrafene Wetterprognosen oder Aktienkurse zählen zum allgemeinen Erfahrungshorizont. Debatten über probabilistische Implikationen erfordern zumeist umfangreiche Kenntnisse über komplexe Zusammenhänge und verkommen leicht zu Polarisierungen, bei denen unbeirrbar Meinungen an die Stelle von Argumenten treten.

Der öffentliche Charakter ökologischer Probleme zwingt die politischen Instanzen zur Fixierung von Normen hinsichtlich gesundheitlicher Folgen für Mensch und Natur. Die fachliche Basis hierfür sollte der aktuelle Stand der einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnisse sein. Die dafür eingeholte wissenschaftliche Expertise liefert jedoch günstigstenfalls ausschließlich probabilistische Aussagen, die öffentlich ggf. nicht als solche

erkannt und fälschlich entweder als unbestreitbar überinterpretiert oder als unwissenschaftlich bestritten werden.

Die Entscheidung über Grenzwerte, das heißt die schließlich entscheidende Festsetzung der cut-offs auf der jeweiligen Gefahrenskala, obliegt schließlich den dafür zuständigen, gewählten, politischen Instanzen, die für ihre Abwägungen über hinreichende Informationen bezüglich der einschlägigen Forschungen verfügen sollten.

Die politischen Instanzen müssten außerdem in der Lage sein, die Berücksichtigung der in Kapitel 4 genannten einschlägigen Forschungen jederzeit zu belegen und transparent zu machen, wie die wissenschaftlichen Empfehlungen zur Ableitung entsprechender Regelungen verarbeitet wurden. Nach Recherchen im Zuge der vorliegenden Arbeit ist Letzteres jedoch begründet in Zweifel zu ziehen, der sich durch folgende Beobachtung manifestiert:

Nach der Publikation eines Lungenarztes im Jahr 2018, die Grenzwerte seien wissenschaftlich nicht begründet¹¹² waren die Vertreter der Bunderegierung nicht in der Lage, diese Behauptung durch Vorlage entsprechender Dokumente zu widerlegen. Das stattdessen während der heftigen öffentlichen Debatte bei der Leopoldina in Auftrag gegebene Gutachten ist – unabhängig von seinem wissenschaftlichen Niveau (Kapitel 9) – insofern kurios, als hierdurch dem Zustandekommen der 39. BImSchV posthum eine wissenschaftliche Begründung gegeben werden sollte, die doch eigentlich mit Inkrafttreten des Gesetzes hätten vorliegen müssen.

¹¹² Vgl. KÖHLER, Dieter, HETZEL, Martin, KLINGNER, Matthias & KOCH, Thomas 2018. *Stellungnahme zur Gesundheitsgefährdung durch umweltbedingte Luftverschmutzung, insbesondere Feinstaub und Stickstoffverbindungen (NOx)* [Online]. Verfügbar unter: https://www.lungenaerzte-im-netz.de/fileadmin/pdf/Stellungnahme__NOx_und__Feinstaub.pdf [Abgerufen am 04.10.2021 2021].

9.2 Politik engagiert ‚wissenschaftliche Expertise‘

Im Sommer 2018 und damit acht Jahre nach Inkrafttreten der 39. BImSchV beflügelten die Umsetzung der EU-NEC-Richtlinie 2016/2248 als 43. Bundes-Immissionsschutzverordnung¹¹³ in Deutschland und ab 2019 das Vorhaben der Bundesregierung, die durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz geregelten Obergrenzen für Stickstoffdioxid nach oben hin zu lockern¹¹⁴, das öffentliche Interesse an den Vorschriften zur Luftreinhaltung. Während anfänglich überwiegend Fragen der Betroffenheit und der Wirksamkeit dieser Reduktionen im Vordergrund standen, geriet die Debatte durch die Einmischung eines Lungenarztes zu einem bizarren Schauspiel, in dem insbesondere auch die Angemessenheit der vorgeschriebenen Obergrenzen in Zweifel gezogen wurde.

Bereits Stunden nach Publikation der Stellungnahme¹¹⁵ eines wissenschaftlich bisher nicht in Erscheinung getretenen Pneumologen, in der dieser meinte, die z.Z. gültige 39. BImSchV mit dem Hinweis auf sogenannte Nichtwissenschaftlichkeit als sinnlos beiseiteschieben zu können, hat der derzeitige Verkehrsminister dessen Botschaft genutzt, um die gesäten Zweifel zu loben und die EU zu einer Überprüfung der Grenzwerte aufzufordern. Es fällt schwer, die zeitliche Nähe beider Auftritte als zufällig zu interpretieren¹¹⁶.

Öffentliche Zweifel an der Einlassung des Pneumologen und die prompte Sympathiebekundung durch das Verkehrsministerium haben dann die Bundeskanzlerin Ende Januar 2019 offenbar dazu bewogen, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina zu bitten, sich zwecks Klärung im Rahmen ihrer wissenschaftsbasierten Beratung von Politik und Öffentlichkeit mit der Luftverschmutzung insbesondere durch Stickoxide und deren gesundheitlichen Folgen auseinanderzusetzen.

Im Hinblick auf die komplexe Form der Luftbelastung durch verschiedene Gase und Aerosole erscheint die Einschränkung auf Stickoxide als wenig sinnvoll und jedenfalls

¹¹³ In dieser neuen Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz werden für bestimmte Luftschadstoffe Reduktionsziele für die Jahre 2020 und 2030 vorgegeben.

¹¹⁴ DEUTSCHER BUNDESTAG 2019. *Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Dreizehnten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* Berlin, Deutscher Bundestag.

¹¹⁵ KÖHLER, Dieter 2018. *Feinstaub und Stickstoffdioxid (NO₂): Eine kritische Bewertung der aktuellen Risikodiskussion*. Deutsches Ärzteblatt International, 115, 1645-1650.

¹¹⁶ DIERKS, Benjamin. 2019. *Glaube keiner Statistik, die Du nicht nutzen kannst* [Online]. Deutschlandfunk. Verfügbar unter: https://www.deutschlandfunk.de/politik-und-experten-glaube-keiner-statistik-die-du-nicht.724.de.html?dram:article_id=443653 [Abgerufen am 11.05.2021].

unbegründet, zumal überwiegend Feinstaub die öffentliche Debatte belebte und Stickoxide und Feinstaub als Luftbelastungen in enger Beziehung zueinanderstehen¹¹⁷.

Das Ergebnis dieser ‚Auseinandersetzung‘ hat eine Arbeitsgruppe der Leopoldina dann bereits Anfang April 2019 als sogenannte Ad-hoc Stellungnahme¹¹⁸ unter dem Titel "Saubere Luft, Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen" veröffentlicht. Der Zusatz ad-hoc mag die Autoren entschuldigen, zumal sie ohne einschlägige Expertise in der Kürze der Zeit nicht in der Lage waren, die Problematik wirklich zu durchschauen und objektiv abzubilden, wie die folgenden Passagen des ‚Gutachtens‘ belegen.

Bereits das tendenziöse Vorwort auf Seite 4 der Publikation lässt erhebliche Zweifel an Kompetenz und kritischer Objektivität der Verfasser dem Thema gegenüber aufkommen und präpariert einen Meinungskorridor, in dem sich der gesamte Text dann bewegt:

Extreme Luftverschmutzung bis hin zum Smog kennt man heute vor allem aus Metropolen wie Delhi, Peking oder Kairo. In Europa gehören solche Ereignisse inzwischen der Vergangenheit an. Dank besserer Filtertechnik in den Kraftwerken und der Einführung von Katalysatoren und bleifreiem Benzin für Autos ist der Schadstoffgehalt der Luft in Deutschland stark gesunken (S.4).

Der Hinweis auf die Metropolen Delhi, Peking und Kairo und die relative Besserstellung Europas ändert nichts an der objektiven Problematik europäischer Ballungsgebiete. Offenbar ist den Verfassern mit dem Hinweis auf frühere Jahre entgangen, dass die heutigen Probleme trotz bleifreiem Benzin (seit 1983) und Katalysator (seit 1984) existieren und ihre Ursache mutmaßlich in dem enorm gestiegenen Energieverbrauch in den letzten drei Jahrzehnten zu sehen ist (Abbildung 24).

Auf Basis der Daten von über 2200 Messstellen kommt die Europäische Umweltagentur am 26.4.2018 zu folgendem Ergebnis:

Die meisten in europäischen Städten lebenden Menschen sind schlechter Luftqualität ausgesetzt. Den jüngsten heute veröffentlichten Schätzungen der Europäischen Umweltagentur (EUA) zufolge ist Feinstaub PM_{2,5} Ursache für den vorzeitigen Tod von jährlich über 400 000 Menschen in Europa¹¹⁹.

An anderer Stelle der Leopoldina-Stellungnahme heißt es

¹¹⁷ Bei Motoren mit Direkteinspritzung beschreibt die sogenannte "Ruß-NOx Schere" den Zielkonflikt einer physikalisch/ chemisch bedingten negativen Korrelation zwischen Ruß/ Feinstaub und NOx.

¹¹⁸ NATIONALE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN LEOPOLDINA 2019. *Saubere Luft: Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen*, Halle (Saale), NA der Wissenschaften Leopoldina.

¹¹⁹ EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR (EUA). 2018. *Luftverschmutzung in Europa nach wie vor zu hoch* [Online]. Europäische Umweltagentur (EUA), . Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/de/highlights/luftverschmutzung-in-europa-nach-wie> [Abgerufen am 26.05.2019].

Luftverschmutzung lässt sich, so zeigen die Beispiele, in den Griff bekommen. Das gilt auch für die weiterhin problematischen Substanzen Stickstoffdioxid, Feinstaub und Ozon, die vor allem in Ballungsräumen und an Orten mit starkem Verkehrsaufkommen Probleme bereiten (S.4).

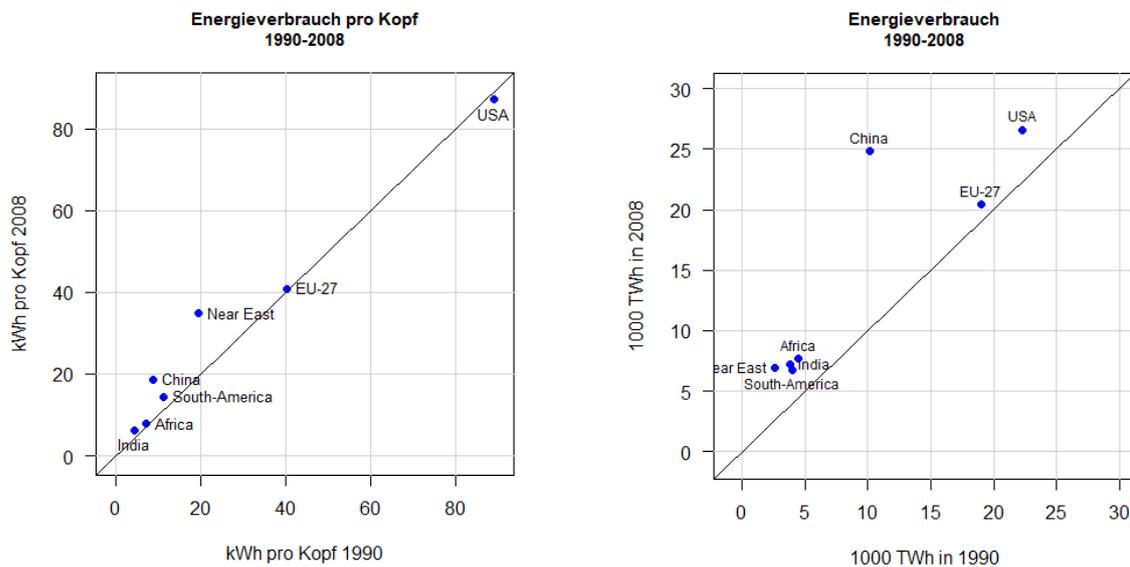


Abbildung 24: Energieverbrauch weltweit im Vergleich 1990 und 2008¹²⁰

Die hier angekündigten Beispiele werden auch im weiteren Verlauf des Gutachtens nicht genannt. Außerdem ist die Aussage bezüglich Ozons definitiv falsch. "An Orten mit starkem Verkehrsaufkommen" sind die Ozonwerte relativ unauffällig. Denn einerseits wird Ozon durch das Stickstoffmonoxid der Autoabgase in Ballungsgebieten abgebaut und andererseits werden seine Vorläuferstoffe durch Luftbewegungen aus den Städten in ländliche Gebiete transportiert, wo sie, entfernt von den städtischen Quellen, zur Ozonbildung beitragen. Entsprechend tritt die Ozonbelastung vor allem am Stadtrand und in stadtnahen ländlichen Gebieten auf¹²¹.

Im folgenden Absatz des Vorworts heißt es im Leopoldina Gutachten

Vor diesem Hintergrund hat Bundeskanzlerin Angela Merkel die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina Ende Januar 2019 gebeten, sich im Rahmen ihrer wissenschaftsbasierten Beratung von Politik und Öffentlichkeit mit der Luftverschmutzung insbesondere durch NO₂ und deren gesundheitlichen Folgen auseinanderzusetzen (S.4).

¹²⁰ STATISTISCHES BUNDESAMT. 2021a. *Energieverbrauch weltweit* [Online]. Wiesbaden: Statista GmbH. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6691/dokument/energieversorgung-und-energieverbrauch---statista-dossier-2012/> [Abgerufen am 05.10.2021 2021].

¹²¹ Letzter Absatz in Anlehnung an: UMWELTBUNDESAMT. 2011. *Wo treten die höchsten Ozonwerte auf?* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wo-treten-die-hoechsten-ozonwerte-auf> [Abgerufen am 05.10.2021 2021].

Wie oben erwähnt, erscheint die Betonung "Luftverschmutzung insbesondere durch NO₂" angesichts der vielfältigen anderen gesundheitlich relevanten Luftbelastungen bemerkenswert und erklärungsbedürftig.

Auf Seite 7, Absatz 3 des Leopoldina-Textes heißt es unter "Die Stellungnahme in Kürze" wörtlich und ohne spätere Ergänzung, Begründung oder Interpretation

Feinstaub gefährdet die Gesundheit weitaus stärker als Stickstoffdioxid (S.7).

Der - ohne Mengenangabe beider Stoffe - sachliche Unsinn dieser Aussage hindert die Verfasser nicht daran, sie den Lesern ungeniert als Begründung für folgende umweltpolitisch möglicherweise folgenschwere Empfehlung anzubieten:

Angesichts dieser vergleichsweise geringeren Gesundheitsbelastung durch Stickstoffdioxid erscheint eine Verschärfung des geltenden Grenzwerts aus wissenschaftlicher Sicht nicht vorzudringlich (S.7).

An anderer Stelle der "Empfehlungen" heißt es dann

Durch chemische Umwandlungen in der Atmosphäre und Reaktion mit Ammoniak kann sich beispielsweise Ammoniumnitrat bilden, das als Sekundäraerosol erheblich zur Feinstaubbelastung beiträgt (S. 14).

Nach der zum Zeitpunkt der obigen Publikation aktuellen Überprüfung der Datenlage zur Luftqualität¹²² durch die WHO im Jahr 2013 sollte der Grenzwert für NO₂ wegen seiner hohen gesundheitlichen Schädlichkeit deutlich gesenkt werden, denn sowohl Kurz- als auch Langzeitstudien haben die schädlichen Auswirkungen bei Konzentrationen gefunden, die bei oder deutlich unter den aktuellen EU-Grenzwerten lagen. Inzwischen liest man in den seit September 2021 publizierten WHO Richtlinien¹²³ sogar die Empfehlung eines Jahresgrenzwerts 10 µg/m³, womit der bisherige WHO Grenzwert (dem der EU-Grenzwert entspricht) von 40 µg/m³ auf ein Viertel reduziert wurde.

Weiterhin liest man in den "Zentralen Aussagen" der Leopoldina

Moderne Fahrzeugmotoren (...) tragen relativ wenig zur derzeit gemessenen direkten Feinstaubbelastung bei. Reifen- und Bremsabrieb hingegen sind weiterhin von Bedeutung (S.8).

Die Verfasser erfinden den in der Fachliteratur unbekanntem Begriff einer "direkten Feinstaubbelastung". Wenn damit die Unterscheidung zwischen primärem und sekundärem Feinstaub gemeint sein soll, so ist die Aussage definitiv falsch, denn die in der

¹²² WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP Project: Technical Report*, Copenhagen, World Health Organization.

¹²³ WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE 2021. *Air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide and carbon monoxide; Executive summary*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. P.4

39.BImSchV vorgeschriebene gravimetrische Bestimmung des Feinstaubes kann gar nicht zwischen verschiedenen Formen der Entstehung von Feinstaub unterscheiden.

Mit Ausnahme des letzten Satzes ist keine der folgenden Aussagen fehlerfrei bzw. fachsprachlich vertretbar. Das dabei von den Verfassern entworfene Konzept "akute versus langfristige gesundheitliche Wirkungen" und insbesondere die dafür genannten angeblich probaten, empirischen Mittel ihrer Beforschung entspricht nicht der üblichen Methodologie.

Bei den gesundheitlichen Belastungen unterscheidet man generell akute und langfristige Wirkungen. Akute Wirkungen werden experimentell mit relativ hohen Konzentrationen eindeutig definierter Substanzen (toxikologische Studien) sowie in Bevölkerungsstudien unter realen Bedingungen (epidemiologische Studien) untersucht. Langfristige Wirkungen lassen sich durch die epidemiologische Untersuchung unterschiedlich belasteter Personen über längere Zeit erfassen. Es versteht sich, dass die Untersuchungsbedingungen hierbei weniger genau definiert sind, dafür werden Alltagsbelastungen besser erfasst. Aus epidemiologischen Untersuchungen kann man verschiedene, sich gegenseitig ergänzende Maßzahlen für die gesundheitliche Belastung berechnen, zum Beispiel den Verlust von Lebenszeit durch das Einatmen bestimmter Luftschadstoffe. Unter den Umweltfaktoren, die in Deutschland zu Erkrankungen und Verkürzung der Lebenszeit beitragen, ist Luftverschmutzung der wichtigste (S.8).

Das empirisch relevante Instrumentarium wird hier nicht korrekt beschrieben.

Auf Seite 10 ihres Textes heißt es

Bei Stickstoffdioxid ist der Trend insgesamt rückläufig. Zu Überschreitungen des Jahresmittelwerts kommt es derzeit an etlichen viel befahrenen Straßen (S. 10).

Wann ist ein Trend "insgesamt" rückläufig? Und wenn, seit wann und wie stark und wo und wo nicht? Satz 2 ist eine Aussage ohne empirischen Inhalt, denn in symmetrischen Verteilungen liegen Einzelwerte je zur Hälfte unter bzw. über dem Mittelwert.

Angesichts der im Vergleich zu Feinstaub geringeren gesundheitlichen Belastung durch Stickstoffdioxid erscheint eine Verschärfung des entsprechenden Grenzwerts aus wissenschaftlicher Sicht nicht vordringlich (S.9).

Die Autoren verlassen ihren eingangs angelegten Meinungskorridor nicht. Die weiter oben ohne Beleg unterstellte "geringere Schädlichkeit der Stickoxide" wird hier bereits als gesichert verwendet. Die Logik dahinter ist sonderbar: Eine Verschärfung der Grenzwerte für Stickoxide sei nicht erforderlich, weil sie gesundheitlich weniger belastend seien als Feinstaub.

Am 12. März 2019, d.h. in dem Zeitraum, in dem die Leopoldina ihren Bericht verfasste, haben die Koalitionsparteien des Bundestages auf Initiative des Verkehrsministers in einer Ausschusssondersitzung die schon zum Jahreswechsel entworfene o.g. Änderung

des Bundes-Immissionsschutzgesetzes¹²⁴ ,beschlossen¹²⁵, die von Seiten der FDP durch die Forderung eines Moratoriums für Stickoxidgrenzwerte gestützt wurde. Durch eine Novellierung sollte der Grenzwert für Stickoxid-Immissionen von 40 auf 50 µg/m³ erhöht werden, was die zuständige EU-Kommission umgehend ablehnte und auf schnellstmögliche Einhaltung des NO₂-Grenzwerts – ggfs. auch durch Fahrverbote – drängte.

Der Hintergrund dieser Eskapade lässt sich wie folgt interpretieren:

Das Mengenverhältnis von Stickoxid und Feinstaub ist in den Emissionen aller GDI-Motoren¹²⁶ von der Temperatur der Verbrennung abhängig, die sich durch die digitale Motorsteuerung problemlos verändern lässt. Bei höheren Temperaturen erreicht man eine Reduktion von Feinstaub allerdings nur bei gleichzeitiger Zunahme der Stickoxide¹²⁷.

Die Automobilhersteller sollten also durch eine Anhebung der Stickoxidgrenzen zu einer kostengünstigen Absenkung der Feinstaubwerte ohne Hardware-Eingriffe kommen.

Der gescheiterte Versuch der Bundesregierung, den Grenzwert von Stickoxiden um 10 µg/m³ zu erhöhen und die Erklärung der Leopoldina über die angeblich geringere gesundheitliche Bedeutung der Stickoxide passen also inhaltlich und zeitlich gut zusammen.

In diesem Zusammenhang ist auch zu bedenken, dass die gegenwärtig im Fokus stehende Stickstoffdioxidbelastung durch die Fahrzeugflottenmodernisierung voraussichtlich binnen fünf Jahren so stark zurückgehen wird, dass die geltenden Grenzwerte weitgehend eingehalten werden können (S.9).

Abgesehen davon, dass keine autorisierte Erklärung der Autoindustrie bekannt ist, auf die sich diese Prognose stützen könnte, zeigt insbesondere die Reduktion auf die erhoffte "Fahrzeugflottenmodernisierung" allein der PKW bei Außerachtlassung aller anderen Formen des Verkehrs sowie der Beiträge zur Luftverschmutzung durch Industrie, Landwirtschaft und Haushalte, dass die eigentliche Absicht der Leopoldina-Verfasser darin bestand, die Autoindustrie vor den Konsequenzen der Regularien zur Luftreinhaltung zu schützen.

¹²⁴ DEUTSCHER BUNDESTAG 2019. *Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Dreizehnten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* Berlin, Deutscher Bundestag.

¹²⁵ DEUTSCHE UMWELTHILFE E.V. 2019. *Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: Deutsche Umwelthilfe begrüßt Klarstellung der EU-Kommission, wonach der für Fahrverbote geltende Grenzwert weiterhin 40 µg NO₂/m³ beträgt* [Online]. Deutsche Umwelthilfe e.V. Verfügbar unter: <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/aenderung-des-bundes-immissionsschutzgesetzes-deutsche-umwelthilfe-begruesst-klarstellung-der-eu-kommi/> [Abgerufen am 12.5.2021].

¹²⁶ Diesel und Benzin-Direkteinspritzer

¹²⁷ Sogenannte Ruß-Nox-Schere bei Verbrennungen in Motoren mit Direkteinspritzung (GDI)

Wenn die o.g. Aussage der Leopoldina zuträfe, wäre das Plädoyer der Verfasser gegen eine Absenkung der gesetzlichen Grenzwerte für Stickoxide bei künftig „stark zurückgehenden Emissionen“ ohnehin irrelevant.

Sind die Grenzwerte aber einmal festgelegt, sind sie auch verbindlich. Dann können Überlegungen zur Verhältnismäßigkeit nur noch in begrenztem Maße berücksichtigt werden. Das gilt vor allem für europäische Grenzwerte, die von Deutschland übernommen wurden (S. 39).

Die Formulierung des letzten Halbsatzes "die von Deutschland übernommen wurden" soll offenbar den Eindruck erwecken, als habe die EU die Grenzwerte quasi als Dekret verkündet und verordnet. Die Verfasser hätten durch eine kurze Internet-Recherche leicht in Erfahrung bringen können, mit welchem Gewicht die Vertreter Deutschlands maßgeblich an der Formulierung der EU-Richtlinie von 2008 mitgewirkt haben.

Gewissermaßen als Finale der gesamten Inszenierung veröffentlichte DIE ZEIT am 9. April 2019 einen in hohem Maß irritierenden Artikel¹²⁸, mit dem offenbar die breite Öffentlichkeit überzeugt oder eher überredet und beruhigt werden sollte.

Unter dem Titel

Genug gestritten! Wie gefährlich sind Stickoxide? Im pseudowissenschaftlichen Grenzwertstreit legt die Leopoldina ein Gutachten voller wissenschaftlicher Gewissheiten vor. Wie heilsam.

durfte der in der Sache offenbar nicht bewanderte Schreiber als Schiedsrichter das Leopoldina-Machwerk als "ein Schlichtungsspruch zwischen zwei wissenschaftlich ungleichen Lagern"¹²⁹ verkünden, ohne den Lesern allerdings mitgeteilt zu haben, welche Lager das eigentlich sind und worin die Beweisführung des „Schlichtungsspruchs“ bestünde.

Neben den geschilderten Besonderheiten des Gutachtens der Leopoldina stellt sich schließlich die Frage, warum die Verfasser, die sich doch laut Auftrag insbesondere mit den Luftbelastungen durch Stickoxide befassen sollten, lediglich den Straßenverkehr und hier nahezu ausschließlich die PKW als mögliche Verursacher diskutieren, ohne auch nur ein Wort über die bekannten anderen Quellen der Luftverschmutzung zu verlieren. Insofern fragt es sich auch, warum der Auftraggeber die von der Leopoldina vorgenommene Einschränkung des Auftrags nicht moniert hat, sondern den Text gar als "voller wissenschaftlicher Gewissheiten" der Öffentlichkeit hat darbieten lassen.

¹²⁸ SIMMANK, Jakob. 2019. *Leopoldina: Genug gestritten! - Wie gefährlich sind Stickoxide? Im pseudowissenschaftlichen Grenzwertstreit legt die Leopoldina ein Gutachten voller wissenschaftlicher Gewissheiten vor. Wie heilsam.* [Online]. Die Zeit. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2019-04/leopoldina-stickoxid-grenzwerte-dieselfahrzeuge-lungenfachaerzte-positionspapier> [Abgerufen am 12.05.2021].

¹²⁹ Ebd.

9.3 Relevanz des Themas innerhalb der deutschen Forschungsförderung

Vor dem Hintergrund des im vorherigen Kapitel dargestellten mindestens partiellen Desinteresses der Bundesregierung, den Gefahren durch Luftverschmutzung einen angemessenen Stellenwert einzuräumen, stellte sich die Frage, inwiefern Deutschland aktiv zum internationalen Erkenntnisgewinn diesbezüglich beiträgt.

Ein zentrales Register, das einen Überblick über die Förderung bestimmter Forschungsthemen ermöglichte, sucht man für Deutschland allerdings vergeblich. Finanzielle Leistungen zur Unterstützung von Forschungsprojekten zum Thema 'Gesundheitliche Folgen von Luftbelastung in Deutschland' lassen sich nur in Teilbereichen und auch nicht vollständig und einheitlich abfragen. Der Nachweis für die Aussichtslosigkeit einer Suche kann kaum jemals vollständig gelingen, mindestens kann sie aber wie folgt nachgezeichnet werden.

	Ausgaben für Forschung bzgl. Luftbelastung in Mrd. Euro						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Wirtschaft	38.7	46.9	51.1	61.0	62.8	68.8	72.1
Staatlich	1.1	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8
Privat	6.7	8.8	9.5	10.9	11.0	11.7	12.4
Hochschulen	9.4	12.7	13.5	15.3	16.6	17.3	18.6
Gesamt	55.9	70.0	75.6	88.8	92.2	99.6	104.8

Tabelle 8: Forschungsausgaben in Euro (2012-18) 130

Die Gesamtausgaben von rund 104,8 Mrd. Euro¹³¹ für Forschung und Entwicklung (FuE) lagen in 2018 etwa zu einem Drittel bei Bund & Ländern und zu zwei Dritteln bei der Privatwirtschaft¹³². Zusätzliche 19,5 Mrd. Euro¹³³ vergaben Unternehmen für Forschungsaufträge an andere Unternehmen, Universitäten oder staatliche Forschungsinstitutionen wie die Max-Planck-Gesellschaft oder die Fraunhofer-Gesellschaft¹³⁴. In der

¹³⁰ STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) 2020a. *Bildungsausgaben: Budget für Bildung, Forschung und Wissenschaft 2017/2018*, Wiesbaden, Statistisches Bundesamt (Destatis).

¹³¹ Ausgaben 2018 ca. 3,1% des BIP (Bruttoinlandsprodukt). In der EU liegen nur die Ausgaben von Dänemark, Österreich und Schweden um jeweils bis zu 2% höher.

¹³² STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS). 2020b. *Interne Ausgaben für Forschung und Entwicklung nach Sektoren und Berichtsjahren -Millionen Euro-* [Online]. Verfügbar unter:

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Forschung-Entwicklung/Tabellen/forschung-entwicklung-sektoren.html> [Abgerufen am 03.05.2020].

¹³³ Diese kommen als ‚externe Ausgaben‘ zu den oben genannten 72,1 Mrd. Euro hinzu.

¹³⁴ STIFTERVERBAND FÜR DIE DEUTSCHE WISSENSCHAFT 2017. *Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft 2017*, Essen, Stifterverband für die deutsche Wissenschaft.

Privatwirtschaft sind die Ausgaben von 2010-17 mit ca. 50% stark gestiegen. Fokus liegt auf den Wirtschaftszweigen Chemie, Kraftfahrzeugindustrie, Maschinenbau, Pharmakologie und Elektrotechnik, der Bereich Klima & Umwelt spielt „quantitativ betrachtet eine untergeordnete Rolle“¹³⁵.

Auf staatlicher Seite ist der Grund für die mangelhafte Nachvollziehbarkeit der Forschungsförderung vermutlich darin zu sehen, dass das deutsche Forschungs- und Innovationssystem (FuI) von dem Zusammenwirken vieler unterschiedlicher Akteure und von einer föderalen Struktur und Historie geprägt ist. Bund und Länder finanzieren teilweise zusammen, teilweise getrennt voneinander. Die gemeinsame Förderung beläuft sich insgesamt auf ca. 15 Mrd. Euro, das entspricht etwa der Hälfte ihres Gesamtbudgets und 15% der gesamtdeutschen Ausgaben für F&E¹³⁶. Gemeinsame Entscheidungen betreffen die Projektförderung¹³⁷, die institutionelle Förderung (z.B. von Forschungsorganisationen und DFG), die Finanzierung der Ressortforschung¹³⁸ oder die Förderung von Forschungsbauten und im Ministergremium Gemeinsame Wissenschaftskonferenz (GWK) statt¹³⁹.

Für den Teilbereich Programm- und Projektförderung stellt die Bundesregierung folgende Möglichkeiten für eine derartige Recherche zur Verfügung, deklariert aber schon eingangs die Unvollständigkeit der Register.

- Projektförderung (Ressortforschung): Förderkatalog der Bundesregierung¹⁴⁰
Inhalt: 110.000 abgeschlossene und laufende Vorhaben der Projektförderung; 6 von insgesamt 14 verschiedenen Bundesministerien listen ausgewählte

¹³⁵ STIFTERVERBAND FÜR DIE DEUTSCHE WISSENSCHAFT E.V. 2019. *Ausgaben für Forschung und Entwicklung auf Rekordhoch* [Online]. Verfügbar unter: https://www.stifterverband.org/pressemitteilungen/2019_05_14_forschung_und_entwicklung [Abgerufen am 03.05.2020].

¹³⁶ GEMEINSAME WISSENSCHAFTSKONFERENZ. o. J. *Finanzierungsübersicht: Gemeinsame Förderung von Bund und Ländern auf der Grundlage von Art. 91 b Absatz 1 GG* [Online]. Gemeinsame Wissenschaftskonferenz, Verfügbar unter: <https://www.gwk-bonn.de/themen/finanzierung-von-wissenschaft-und-forschung/finanzierungsuebersicht/> [Abgerufen am 21.06.2019].

¹³⁷ Die Projektförderung durch die Ressorts erfolgt in Förder- bzw. Fachprogrammen auf der Grundlage eines Antrags für ein zeitlich befristetes Vorhaben. In der Projektförderung werden neben Einzelprojekten auch Verbundprojekte mit mehreren Partnern finanziert.

¹³⁸ Ressortforschung erfolgt durch staatliche Forschungseinrichtungen. Jedes Bundesministerium ist für die Ressortforschung in seinem Geschäftsbereich selbst verantwortlich (Ressortprinzip). Ressortforschung wird entweder unmittelbar von den Bundesministerien selbst oder durch die derzeit 37 Bundeseinrichtungen mit FuE-Aufgaben betrieben bzw. beauftragt. Ressortforschungseinrichtungen arbeiten dauerhaft an aktuellen, angewandten Fragestellungen, betreiben staatliche Messnetze und stellen kontinuierlich Daten bereit, auf denen andere FuE-Einrichtungen sowie sonstige Nutzer im öffentlichen Raum aufbauen.

¹³⁹ Artikel 91 b Absatz 1 Grundgesetz

¹⁴⁰ BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. o. J. *Förderkatalog* [Online]. Verfügbar unter: <https://foerderportal.bund.de/foekat> [Abgerufen am 03.05.2020].

Zuwendungsbereiche.

Der Förderkatalog stellt keine vollständige Abdeckung aller in den genannten Ministerien bewilligten Zuwendungsfälle dar, sondern jedes Ressort entscheidet eigenverantwortlich welche Zuwendungsbereiche in den Förderkatalog gestellt werden.

- Programmförderung: Förderdatenbank des Bundes¹⁴¹

Inhalt: Förderprogramme des Bundes, der Länder und der Europäischen Union; Katalog listet nicht allein die Forschungsförderung, sondern ebenso die Förderung von Existenzgründungen, privater Weiterbildung, Solartechnik, Mittelstand etc. Allein diese diffuse Aggregation zeigt die grundsätzliche Schwierigkeit eines tracing der Ausgaben für die Beforschung der Luftreinhaltung.

Eine stichprobenartige Abfrage beider Register ergab die folgende „Ergebnisse“, die jedoch nur als eine erste Annäherung an die faktische Förderpolitik zu sehen sind:

Internet-Suche: Forschungsförderungen				
	Suchbegriff	Zeitraum	Anzahl	Mio €
Förderkatalog	Feinstaub	2010 - 2019	35	7.5
	PM ₁₀	2006 - 2012	1	0.26
	PM _{2,5}	2006 - 2012	1	0.26
	Luftverschmutzung	2015- 2020	3	0.89
Förderdatenbank	Feinstaub	k.A.	11	k.A.
	PM ₁₀	k.A.	1	k.A.
	PM _{2,5}	k.A.	0	k.A.
	Luftverschmutzung	k.A.	0	k.A.

Tabelle 9: Stichwortsuche in Förderkatalog und Förderdatenbank

Die Ergebnisse sind dürftig und sinnvolle Rückschlüsse auf dieser Basis können nur Vermutungen sein. Mindestens erscheinen die Investitionen in den Themenbereich aber niedrig.

Eine weitere Möglichkeit zur Recherche stellen die Etats der forschenden Einrichtungen selbst dar, so z.B. die gemeinsam von Bund und Ländern geförderten privaten bzw. außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Mit 12,4 Mrd. erhalten über sie 14% der

¹⁴¹ BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. o.J. *Förderprogramme des Bundes, der Länder und der Europäischen Union* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/> [Abgerufen am 16.06.2019].

gesamten bzw. 43% der staatlichen Ful-Ausgaben, davon die Helmholtz-Gemeinschaft 21% (3,19 Mrd. Euro), die DFG mit 14%, die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) mit 11% und die Leibniz-Gemeinschaft 8%¹⁴². Die institutionell geförderten Institutionen wählen selbstständig, welche Forschungsvorhaben sie fördern.

Bei der MPG, die rund 1,6 Mrd. Euro von Bund & Ländern erhält, gilt das sog. Harnack Prinzip¹⁴³, nach dem ihre 84 Institute völlig frei auf wissenschaftlichen Gebieten forschen dürfen, die nicht im Kanon der Universitäten vorkommen. Die Institutsleiter entscheiden jeweils über die bearbeiteten Forschungsgebiete und publizieren die Ergebnisse dezentralisiert. Die Zuordnung der verwendeten Forschungsmittel zu bestimmten Themen wird ex-post institutsübergreifend nicht vorgenommen.

Auch auf direkte Anfrage ist es aus diesen und ähnlichen Gründen nicht möglich von der DFG, MPG oder Helmholtz-Gemeinschaft eine detaillierte Aufschlüsselung ihrer Forschungsmittel zu erhalten¹⁴⁴.

Erhältlich sind nur Investitionen in große Teilbereiche. Welchem dieser Teilbereiche das Themenfeld Luftverschmutzung ganz oder teilweise zuzuordnen ist, lässt sich aber nur vermuten. Beispielhaft wurden einige möglicherweise passende Bereiche aus dem Geschäftsbericht der Helmholtz Gemeinschaft in der folgenden Tabelle dargestellt.

Teilbereich Forschung	Mio €
Geosystem im Wandel	42
Atmosphäre / Klima	42
Technologie, Innovation, Gesellschaft	62
Erneuerbare Energien	8.26
Herz-Kreislauf und Stoffwechsel	47.1

Tabelle 10: Investitionen der Helmholtz Gemeinschaft (eigene Berechnung)

Die DFG hebt sich hier ab und führt für DFG-geförderte Forschungsvorhaben online das Informationssystem Gepris unter gepris.dfg.de, über das sich Detailinformationen abfragen lassen.

¹⁴² GEMEINSAME WISSENSCHAFTSKONFERENZ 2017. *Gemeinsame Förderung des Bundes und der Länder auf der Grundlage des Artikels 91b GG*, Bonn, Gemeinsame Wissenschaftskonferenz.

¹⁴³ nach Adolf von Harnack, von 1911–1930 erster Präsident der Kaiser Wilhelm Gesellschaft, die später zur MPG wurde

¹⁴⁴ siehe E-Mail-Konversation mit diversen Einrichtungen im Anhang

Hier ergab die Recherche z.B. 19 Projekte für den Begriff 'Feinstaub', allerdings ohne Angabe des Fördervolumens.

Für die vom Bund unabhängige Landesförderung gibt es keine zentrale Möglichkeit zur Recherche¹⁴⁵. Von den Landesfördereinrichtungen, wie z.B. die Förderbank Bayern, die Investitions- und Förderbank Niedersachsen oder das Sächsische Landesamt für Straßenbau und Verkehr werden im Internet nur beispielhaft Projekte dargestellt. Auf eine Ansprache der einzelnen Landesstellen wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenso verzichtet wie auf eine individuelle Recherche der Mittelverwendung von Hochschulen und Akademien, deren Förderung den Bundesländern obliegt.

Das politische Gewicht bzw. die wissenschaftliche Bedeutung des Themas Gesundheitsbelastung durch Feinstaub in Konkurrenz zu anderen Themen in Deutschland ist schwer nachvollziehbar. Sucht man über die Hauptnavigation im Bereich 'Forschung' in den relevanten Rubriken 'Gesundheit' sowie 'Umwelt und Klima' auf der Website des BMBF konnte im Zeitraum der Erstellung der Arbeit zu diesem Themenbereich auch nichts gefunden werden. Allerdings findet man auf Rückfrage bzw. bei der Suche nach Forschung unter „weitere Online Angebote des UBA“ (nicht über die Hauptnavigation gelistet) beim UBA eine eigene Datenbank zu Umweltforschungsthemen, die Umweltforschungsdatenbank UFORDAT, die das UBA schon seit 1974 führt. Die Fördersummen müssen allerdings auch hier für jedes Projekt einzeln abgefragt werden, worauf im Rahmen dieser Arbeit verzichtet wurde.

In der UFORDAT¹⁴⁶ findet man öffentlich geförderte Projekte (Bund, Länder, Kommunen und EU), Umweltprojekte der Privatwirtschaft sowie Forschungsprojekte, die von Stiftungen, Verbänden usw. finanziert wurden.

Auf der Website werden Datenquellen wie eigene Datenerhebungen bei forschenden und finanzierenden Einrichtungen, Internetrecherchen, sonstige Quellen wie Pressemitteilungen, Newsletter, Forschungsberichte und Datenlieferungen und Datenaustausch, z.B. mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung angegeben. Letztlich

¹⁴⁵ "Für die Landesförderung ist mir keine zentrale Recherchemöglichkeit bekannt. In der Regel werden von den Landesfördereinrichtungen nur beispielhaft Projekte auf deren Seiten dargestellt. In diesem Fall müssen Sie die Landesfördereinrichtungen ansprechen." (09.07.2017, Förderberatung "Forschung und Innovation" des Bundes; Forschungszentrum Jülich GmbH; Antwort auf Rückfrage per E-Mail siehe Anhang)

¹⁴⁶ Vgl. UMWELTBUNDESAMT. 2020c. *Umweltforschungsdatenbank UFORDAT* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/information-als-instrument/umweltforschungsdatenbank-ufordat> [Abgerufen am 20.06.2019].

handelt es sich also auch hier um die Mühe, fragmentarisch zusammenzufügen, was systematisch nicht verfügbar ist.

	Suchbegriff	Zeitraum	Anzahl
UFORDAT	Feinstaub	2010 - 2019	630
	PM ₁₀	k.A.	71
	PM _{2,5}	k.A.	29
	Luftverschmutzung	k.A.	95
	particulate	k.A.	98
	ambient	k.A.	42
	air	k.A.	1594

Tabelle 11: Stichwortsuche in Umweltforschungsdatenbank UFORDAT

Auf europäischer Ebene ist seit 1990 der Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Gemeinschaft (CORDIS)¹⁴⁷ die wichtigste Quelle für die Ergebnisse der von der Europäischen Kommission finanzierten Projekte aus den Rahmenprogrammen der EU für Forschung und Innovation. Einzelne Projekte oder (Rahmen-) Programme sind gut dokumentiert, hinsichtlich einer Übersicht über Projekte stellt sich die Situation allerdings ähnlich diffus dar.

Die hier dargestellten Bemühungen sowie eine Reihe gezielter telefonischer Kontakte mit dem Ziel, einen Überblick über die finanziellen Volumina staatlich geförderter Forschungen zu erlangen, zeigte, dass offenbar die gesuchte Information weder griffbereit vorliegt noch durch umfangreiche Bemühungen zu gewinnen ist. Mit anderen Worten, Umfang und Effizienz staatlicher Bemühungen in der Forschungsförderung bzgl. Luftbelastungen sind derzeit wissenschaftlich nicht zu ermitteln und Anfragen in einschlägigen Einrichtungen stoßen auf eine durch sektorale Grenzen begründete Hilflosigkeit der Kontaktpersonen.

¹⁴⁷ EUROPÄISCHE KOMMISSION. o. J. *CORDIS: EU research results* [Online]. Brüssel. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/> [Abgerufen am 20.06.2019].

Literaturverzeichnis

- ASBACH, Christof , BALTENSPERGER, Urs, BRUCKMANN, Peter , BUILTJES, Peter J. H. , DESPRÉS, Viviane , DIEGMANN, Volker , DOPP, Elke , EBEL, Adolf & EIKMANN, Thomas 2010. *Statuspapier Feinstaub*, Frankfurt am Main, GDCh-/KRdL-/ ProcessNet-Gemeinschaftsausschuss 'Feinstäube'.
- BITTIG, Margot & HAEP, Stefan 2014. Maßnahmen zur Minderung luftseitiger Emissionen unter besonderer Berücksichtigung von Quecksilber, Feinstaub und Stickoxiden. *In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. & BECKMANN, M. (eds.) Energie aus Abfall*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- BREUER, R. 1988. Umweltschutzrecht. *In: MÜNCH, I. V., BADURA, P., FRIAUF, K. H. & OPPERMANN, T. (eds.) Besonderes Verwaltungsrecht*. Berlin: de Gruyter.
- BROOK, Robert D, FRANKLIN, Barry, CASCIO, Wayne, HONG, Yuling, HOWARD, George, LIPSETT, Michael, LUEPKER, Russell, MITTLEMAN, Murray, SAMET, Jonathan & SMITH JR, Sidney C 2004. *Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association*. *Circulation*, 109, 2655-2671.
- BROOK, Robert D., CAKMAK, Sabit, TURNER, Michelle C., BROOK, Jeffrey R., CROUSE, Dan L., PETERS, Paul A., VAN DONKELAAR, Aaron, VILLENEUVE, Paul J., BRION, Orly, JERRETT, Michael, MARTIN, Randall V., RAJAGOPALAN, Sanjay, GOLDBERG, Mark S., POPE, C. Arden & BURNETT, Richard T. 2013. *Long-Term Fine Particulate Matter Exposure and Mortality From Diabetes in Canada*. *Diabetes Care*, 36, 3313-3320.
- BUND. o. J. *Feinstaub – eine Gefahr für Gesundheit und Klima* [Online]. Berlin: BUND. Verfügbar unter: <https://www.bund.net/themen/mobilitaet/schadstoffe/feinstaub/> [Abgerufen am 14.08.2021].
- BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. o. J. *Förderkatalog* [Online]. Verfügbar unter: <https://foerderportal.bund.de/foekat> [Abgerufen am 03.05.2020].
- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. o.J. *Förderprogramme des Bundes, der Länder und der Europäischen Union* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/> [Abgerufen am 16.06.2019].
- BUNDESVERWALTUNGSGERICHT 2007. *Beschluss vom 29.03.2007 - BVerwG 7 C 9.06*, Leipzig, Bundesverwaltungsgericht,.
- CLIFT, Roland, GRACE, John R & WEBER, Martin E 2005. *Bubbles, drops, and particles*, Mineola, Dover Publications Inc.
- COMTE, P., CZERWINSKI, J., KELLER, A., KUMAR, N., MUÑOZ, M., PIEBER, S., PRÉVÔT, A., WICHSER, A. & HEEB, N. 2018. *GASOMEV: Current Status and New Concepts of Gasoline Vehicle Emission Control for Organic, Metallic and*

Particulate Non-Legislative Pollutants, Dübendorf, Empa - Materials Science and Technology.

DAVIES, C.N. 1952. *Dust sampling and lung disease*. British Journal of Industrial Medicine 120-126.

DEUTSCHE ALZHEIMER GESELLSCHAFT. 2020. *Anzahl der Demenzkranken in Deutschland nach Alter und Geschlecht im Jahr 2018 (in 1.000)* [Online]. Heidelberg: Statista GmbH. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246028/umfrage/anzahl-der-demenzkranken-in-deutschland-nach-alter-und-geschlecht/> [Abgerufen am 08.08.2021].

DEUTSCHE ALZHEIMER GESELLSCHAFT E.V. 2020. *Informationsblatt 1: Die Häufigkeit von Demenzerkrankungen*, Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V.

DEUTSCHE UMWELTHILFE E.V. 2019. *Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes: Deutsche Umwelthilfe begrüßt Klarstellung der EU-Kommission, wonach der für Fahrverbote geltende Grenzwert weiterhin 40 µg NO₂/m³ beträgt* [Online]. Deutsche Umwelthilfe e.V. Verfügbar unter: <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/aenderung-des-bundes-immissionsschutzgesetzes-deutsche-umwelthilfe-begruesst-klarstellung-der-eu-kommi/> [Abgerufen am 12.5.2021].

DEUTSCHE UMWELTHILFE E.V. o. J. . *Die Aarhus Konvention* [Online]. Radolfzell: Deutsche Umwelthilfe e.V. Verfügbar unter: <https://www.right-to-clean-air.eu/hintergruende/aarhus-konvention/> [Abgerufen am 27.05.2020].

DEUTSCHER BUNDESTAG 2019. *Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Dreizehnten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* Berlin, Deutscher Bundestag.

DEUTSCHLANDFUNK. 2017. *Direkteinspritzer stoßen immer mehr Feinstaub und Krebsgifte aus* [Online]. Köln: Deutschlandfunk. Verfügbar unter: https://www.deutschlandfunk.de/dreckige-benziner-direkteinspritzer-stossen-immer-mehr.676.de.html?dram:article_id=386764 [Abgerufen am 06.10.2021].

DI, Qian, WANG, Yan, ZANOBETTI, Antonella, WANG, Yun, KOUTRAKIS, Petros, CHOIRAT, Christine, DOMINICI, Francesca & SCHWARTZ, Joel D 2017. *Air pollution and mortality in the Medicare population*. New England Journal of Medicine, 376, 2513-2522.

DIERKS, Benjamin. 2019. *Glaube keiner Statistik, die Du nicht nutzen kannst* [Online]. Deutschlandfunk. Verfügbar unter: https://www.deutschlandfunk.de/politik-und-experten-glaube-keiner-statistik-die-du-nicht.724.de.html?dram:article_id=443653 [Abgerufen am 11.05.2021].

DIESENER, Sönke. 2017. *Emissionen aus der Schifffahrt: Gefahr für Klima und Gesundheit* [Online]. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Verfügbar unter: <https://www.wissenschaftsjahr.de/2016-17/aktuelles/das-sagen-die-experten/emissionen-aus-der-schifffahrt-gefahr-fuer-klima-und-gesundheit.html> [Abgerufen am 14.5.2021].

- DRINKER, Philip & HATCH, Theodore 1936. *Industrial Dust: Hygienic Significance. Measurement and Control*. New York, NY: McGraw-Hill International Book Co, 74.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 1987. *Revisions to the national ambient air quality standards for particulate matter*. Federal Register, 52, 24634-69.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION. o. J. *CORDIS: EU research results* [Online]. Brüssel. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/> [Abgerufen am 20.06.2019].
- EUROPÄISCHE UMWELTAGENTUR (EUA). 2018. *Luftverschmutzung in Europa nach wie vor zu hoch* [Online]. Europäische Umweltagentur (EUA), . Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/de/highlights/luftverschmutzung-in-europa-nach-wie> [Abgerufen am 26.05.2019].
- FIELDNER, Arno Carl, KATZ, Sidney Hershberg & LONGFELLOW, Erskine Shearer 1921. *The Sugar-Tube Method of Determining Rock Dust in Air*, Washington, D.C., U.S. Government Publishing Office (GPO).
- FLUKE DEUTSCHLAND GMBH 2012. *Einfaches Messen der Luftqualität in Innenräumen mit dem Partikelzähler Fluke 985*, Glottertal, Fluke Deutschland GmbH.
- GEMEINSAME WISSENSCHAFTSKONFERENZ 2017. *Gemeinsame Förderung des Bundes und der Länder auf der Grundlage des Artikels 91b GG*, Bonn, Gemeinsame Wissenschaftskonferenz.
- GEMEINSAME WISSENSCHAFTSKONFERENZ. o. J. *Finanzierungsübersicht: Gemeinsame Förderung von Bund und Ländern auf der Grundlage von Art. 91 b Absatz 1 GG* [Online]. Gemeinsame Wissenschaftskonferenz,. Verfügbar unter: <https://www.gwk-bonn.de/themen/finanzierung-von-wissenschaft-und-forschung/finanzierungsuebersicht/> [Abgerufen am 21.06.2019].
- GÜNSTER, Christian, DROGAN, Dagmar, HENTSCHKER, Corinna, KLAUBER, Jürgen, MALZAHN, Jürgen, SCHILLINGER, Gerhard & MOSTERT, Carina 2020. *WIdO-Report: Entwicklung der Krankenhausfallzahlen während des Coronavirus-Lockdowns. Nach ICD-Diagnosekapiteln und ausgewählten Behandlungsanlässen*, Berlin, Wissenschaftliches Institut der AOK (WIdO).
- HEALTH EFFECTS INSTITUTE 2020. *State of Global Air 2020: Special Report*, Boston, Health Effects Institute.
- HOLLAND, Mike 2014. *Cost–benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package*.
- HUBER, Peter M. 1989. *Der Immissionsschutz im Brennpunkt modernen Verwaltungsrechts: Fünfzehn Jahre Bundes-Immissionsschutzgesetz*. Archiv des öffentlichen Rechts, 114, 252-307.
- INFRAS. 2020. *Willkommen zu HBEFA* [Online]. Bern: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.hbefa.net/d/> [Abgerufen am 25.05.2020].

- KALLWEIT, D & BÜNGER, B 2015. *Feinstaub macht krank und kostet Leben– Berechnung jährlich entstehender Kosten durch die Feinstaubbelastung in Deutschland*. UMID: Umwelt und Mensch–Informationsdienst, 2, 96-72.
- KÖCK, Wolfgang & LEHMANN, Katharina 2013. *Die Entwicklung des Luftqualitätsrechts*. ZUR – Zeitschrift für Umweltrecht, 47-64.
- KÖHLER, Dieter 2018. *Feinstaub und Stickstoffdioxid (NO₂): Eine kritische Bewertung der aktuellen Risikodiskussion*. Deutsches Ärzteblatt International, 115, 1645-1650.
- KÖHLER, Dieter, HETZEL, Martin, KLINGNER, Matthias & KOCH, Thomas 2018. *Stellungnahme zur Gesundheitsgefährdung durch umweltbedingte Luftverschmutzung, insbesondere Feinstaub und Stickstoffverbindungen (NO_x)* [Online]. Verfügbar unter: https://www.lungenaerzte-im-netz.de/fileadmin/pdf/Stellungnahme__NOx_und__Feinstaub.pdf [Abgerufen am 04.10.2021 2021].
- LILIENFELD, Pedro, ELTERMAN, Paul B & BARON, Paul 1979. *Development of a prototype fibrous aerosol monitor*. American Industrial Hygiene Association Journal, 40, 270-282.
- LIN, Po-Hsiu, CHEN, Mu-Jean, PAN, Wen-Chi, WU, Chih-Da & SU, Huey-Jen. 2014. *Association between Long-Term Exposures of Fine Particulate Matter and Type 2 Diabetes in Taiwan* [Online]. Verfügbar unter: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/abs/10.1289/isee.2014.P3-729> [Abgerufen am 16.12.2021].
- LINARES, Cristina & DIAZ, Julio 2010. *Short-term effect of PM_{2.5} on daily hospital admissions in Madrid (2003–2005)*. International journal of environmental health research, 20, 129-140.
- LUFTFILTERBAU GMBH. 2020. *ISO 16890: Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik* [Online]. Kiel: Luftfilterbau GmbH. Verfügbar unter: <http://www.iso16890.de/> [Abgerufen am 10.09.2020].
- MAK-KOMMISSION 2002. *Faserstäube, anorganisch - MAK Value Documentation*, Bonn, DFG.
- MCCRAE, John 1913. *The ash of silicotic lungs*, Johannesburg, South African Institute for Medical Research.
- NATIONALE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN LEOPOLDINA 2019. *Saubere Luft: Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen*, Halle (Saale), NA der Wissenschaften Leopoldina.
- NATIONALES LUFTREINHALTEPROGRAMM 2019. *Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland nach Artikel 6 und Artikel 10 der Richtlinie (EU) 2016/2284 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe sowie nach §§ 4 und 16 der Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion bestimmter Luftschadstoffe (43. BImSchV)*

- OGDEN, T.L. & BIRKETT, J.L. 1977. The Human Head as a Dust Sampler. In: WALTON, W. H. (ed.) *Inhaled Particles*. Oxford: Pergamon Press.
- PEKING UNIVERSITY. o.J. *Institute of Social Science Survey: China Family Panel Studies* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.iss.pku.edu.cn/cfps/en/> [Abgerufen am 30.11.2021].
- PENG, Roger D & HICKS, Stephanie C 2021. *Reproducible research: A retrospective*. Annual review of public health, 42, 79-93.
- RODRÍGUEZ-LEOR, Oriol, CID-ÁLVAREZ, Belén, OJEDA, Soledad, MARTÍN-MOREIRAS, Javier, RUMOROSO, José Ramón, LÓPEZ-PALOP, Ramón, SERRADOR, Ana, CEQUIER, Ángel, ROMAGUERA, Rafael, CRUZ, Ignacio, PRADO, Armando Pérez de & MORENO, Raúl 2019. *Impact of the COVID-19 pandemic on interventional cardiology activity in Spain*, Madrid, Permanyer Publications.
- SHAFFER, Rachel M, BLANCO, Magali, LI, Ge, ADAR, Sara D, CARONE, Marco, SZPIRO, Adam, KAUFMAN, Joel D, LARSON, Tim, LARSON, Eric B & CRANE, Paul. 2020. *Fine Particulate Matter and Dementia in the Adult Changes in Thought Study* [Online]. Environmental Health Perspectives. Verfügbar unter: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3678619> [Abgerufen am 16.12.2021].
- SIMMANK, Jakob. 2019. *Leopoldina: Genug gestritten! - Wie gefährlich sind Stickoxide? Im pseudowissenschaftlichen Grenzwertstreit legt die Leopoldina ein Gutachten voller wissenschaftlicher Gewissheiten vor. Wie heilsam.* [Online]. Die Zeit. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2019-04/leopoldina-stickoxid-grenzwerte-dieselfahrzeuge-lungenfachaerzte-positionspapier> [Abgerufen am 12.05.2021].
- STATISTISCHES BUNDESAMT. 2020. *Anzahl der Pflegebedürftigen in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2019 (in 1.000)* [Online]. Wiesbaden: Statista GmbH. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2722/umfrage/pflegebeduerftige-in-deutschland-seit-1999/> [Abgerufen am 04. August 2021].
- STATISTISCHES BUNDESAMT. 2021a. *Energieverbrauch weltweit* [Online]. Wiesbaden: Statista GmbH. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6691/dokument/energieversorgung-und-energieverbrauch---statista-dossier-2012/> [Abgerufen am 05.10.2021 2021].
- STATISTISCHES BUNDESAMT. 2021b. *Entwicklung der Lebenserwartung bei Geburt in Deutschland nach Geschlecht in den Jahren von 1950 bis 2060 (in Jahren)* [Online]. Heidelberg: Statista. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/273406/umfrage/entwicklung-der-lebenserwartung-bei-geburt--in-deutschland-nach-geschlecht/> [Abgerufen am 7.8.21 2021].
- STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) 2020a. *Bildungsausgaben: Budget für Bildung, Forschung und Wissenschaft 2017/2018*, Wiesbaden, Statistisches Bundesamt (Destatis).

- STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS). 2020b. *Interne Ausgaben für Forschung und Entwicklung nach Sektoren und Berichtsjahren -Millionen Euro-* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Forschung-Entwicklung/Tabellen/forschung-entwicklung-sektoren.html> [Abgerufen am 03.05.2020].
- STIFTERVERBAND FÜR DIE DEUTSCHE WISSENSCHAFT 2017. *Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft 2017*, Essen, Stifterverband für die deutsche Wissenschaft.
- STIFTERVERBAND FÜR DIE DEUTSCHE WISSENSCHAFT E.V. 2019. *Ausgaben für Forschung und Entwicklung auf Rekordhoch* [Online]. Verfügbar unter: https://www.stifterverband.org/pressemitteilungen/2019_05_14_forschung_und_entwicklung [Abgerufen am 03.05.2020].
- THE UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 1969. *Anthophyllite Asbestos* [Online]. Washington. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/media/images/anthophyllite-asbestos-0> [Abgerufen am 28.11.2020 2020].
- TOMAS, J. 2016/ 17. *Mechanische Verfahrenstechnik: Einführung in die Partikeltechnologie (Vorlesungsfolien)*, Magdeburg, Universität Magdeburg: Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik.
- UMWELTBUNDESAMT. 2011. *Wo treten die höchsten Ozonwerte auf?* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wo-treten-die-hoechsten-ozonwerte-auf> [Abgerufen am 05.10.2021 2021].
- UMWELTBUNDESAMT 2013. *Das Luftmessnetz des Umweltbundesamts: Langzeitmessungen, Prozessverständnis und Wirkungen ferntransportierter Luftverunreinigungen*, Dessau-Roßlau Umweltbundesamt.
- UMWELTBUNDESAMT. 2019. *Aktuelle Luftdaten* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle-luftdaten#/transgressions> [Abgerufen am 27.06.2019 2019].
- UMWELTBUNDESAMT. 2020a. *Aktuelle Luftdaten* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten/jahresbilanzen/eJxrWpScv9BwUWXqEiMDQ0sAMLQFuQ==> [Abgerufen am 13.04.2020].
- UMWELTBUNDESAMT. 2020b. *Asbest* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/asbest#undefined> [Abgerufen am 28.11.2020 2020].
- UMWELTBUNDESAMT. 2020c. *Umweltforschungsdatenbank UFORDAT* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/information-als-instrument/umweltforschungsdatenbank-ufordat> [Abgerufen am 20.06.2019].

- UMWELTBUNDESAMT. O.J. *Entwicklung der Luftqualität* [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/daten-karten/entwicklung-der-luftqualitaet#entwicklung-der-luftqualitat-in-deutschland> [Abgerufen am 10.12.2018].
- VINCENT, J.H., MARK, D., MILLER, B.G., ARMBRUSTER, L. & OGDEN, T.L. 1990. *Aerosol inhalability at higher windspeeds*. *Journal of Aerosol Science*, 21, 577-586.
- VINCENT, James H. 2007. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*, New York, John Wiley & Sons.
- VOHRA, Karn, VODONOS, Alina, SCHWARTZ, Joel, MARAIS, Eloise A, SULPRIZIO, Melissa P & MICKLEY, Loretta J 2021. *Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem*. *Environmental Research*, 195, 110754.
- WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution - REVIHAAP Project: Technical Report*, Copenhagen, World Health Organization.
- WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE 2021. *Air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide; Executive summary*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- WISSENSCHAFTLICHE DIENSTE DES DEUTSCHEN BUNDESTAGS 2019. *Ausarbeitung: Einschränkung des Schiffsverkehrs auf der Grundlage von Emissionswerten*, Berlin, Deutscher Bundestag.
- ZEIT ONLINE GMBH. 2021. *512 Suchergebnisse für »Feinstaub«* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zeit.de/2021/index> [Abgerufen am 12.05.2021].
- ZHANG, Xin, CHEN, Xi & ZHANG, Xiaobo 2018. *The impact of exposure to air pollution on cognitive performance*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 9193-9197.

Anhang

Korrespondenz zu Forschungsförderung

Gesendet: Montag, 24. Juni 2019 um 13:02 Uhr
Von: "Jakobs, Jürgen" <Juergen.Jakobs@bmu.bund.de>
An: "k.saller@gmx.de" <k.saller@gmx.de>
Betreff: WG: WG: Nachricht vom Kontaktformular auf bmu.de

Sehr geehrte Frau Saller,

vielen Dank für Ihr Interesse an der Ressortforschung des Bundesumweltministeriums (BMU).

Allgemeine Informationen zum Förderportal des Bundes kann das federführende Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beantworten. Das BMBF organisiert und finanziert das Portal; es hat mit der Umsetzung den Projektträger Jülich beauftragt.

Der überwiegende Teil der FuE-Vorhaben des BMU wird von den Behörden unseres Geschäftsbereichs (und nicht vom BMU selbst) öffentlich ausgeschrieben, vergeben und fachlich begleitet. Die Ergebnisse bzw. Abschlussberichte aus diesen Vorhaben werden grundsätzlich allgemein frei zugänglich veröffentlicht, z.B. auf der Internetseite des BMU (<https://www.bmu.de/themen/forschung-foerderung/forschung/forschungs-und-entwicklungsberichte/>; dort aktuell 532 Vorhaben) sowie auf den Internetseiten unserer Bundesämter. Den umfassendsten Überblick bietet die Umweltforschungsdatenbank des UBA (UFORDAT) ([http://doku.uba.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/\\$DirectLink&sp=Swww-gates.uba.de%3A4111](http://doku.uba.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/$DirectLink&sp=Swww-gates.uba.de%3A4111); Datenbestand zu mehr als 140.000 Einzelprojekten). – Eine vollständige Liste aller FuE-Vorhaben haben wir jedoch nicht. Neben den in unserem jährlich beschlossenen Ressortforschungsplan gebündelten FuE-Vorhaben können in geringerem Umfang auch aus anderen Haushaltstiteln Vorhaben finanziert werden, die nicht in eine Gesamtliste einfließen. Zudem gibt es Vorhaben, die aus unterschiedlichen Gründen (z.B. aus Sicherheitsgründen) nicht veröffentlicht werden können.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag
J. Jakobs

Dr. Jürgen Jakobs
Ministerialrat

Leiter des Referats Z III 1 – Forschung
Forschungsbeauftragter des
Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit
Stresemannstr. 128 - 130, 10117 Berlin
Telefon +49 (0)30 18305 2090
E-Mail juergen.jakobs@bmu.bund.de
Internet www.bmu.de

Gesendet: Freitag, 21. Juni 2019 um 12:28 Uhr
Von: "Friedrich, Katharina" <Katharina.Friedrich@helmholtz.de>
An: "Katja Saller" <KatjaSa@gmx.de>
Cc: "Thom, Nadine" <Nadine.Thom@helmholtz.de>
Betreff: AW: Rückfrage Forschungsgelder

Liebe Frau Saller,

ich würde Sie hierzu gern auf unseren Geschäftsbericht 2017 verweisen. Auf Seite 38 sowie ab Seite 42 finden Sie die Forschungsgebiete und Themen, in die Forschungsgelder geflossen sind.

Viele Grüße

Katharina Friedrich

Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.

Katharina Friedrich

Controlling
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2
10178 Berlin
Tel.: +49 30 206 329-35
Fax: +49 30 206 329-65
katharina.friedrich@helmholtz.de | www.helmholtz.de
Präsident: Prof. Dr. med. Dr. h.c. mult. Otmar D. Wiestler
Sitz des Vereins: Bonn · Amtsgericht Bonn VR 7942

Gesendet: Freitag, 21. Juni 2019 um 09:34 Uhr
Von: "Koetting, Rebekka" <Koetting@gwk-bonn.de>
An: "KatjaSa@gmx.de" <KatjaSa@gmx.de>
Betreff: AW: Rückfragen Register Forschungsförderung

Sehr geehrte Frau Saller,
bezüglich Ihrer Fragen kann ich seitens der GWK lediglich auf die über unsere Homepage abrufbare Übersicht über die Gemeinsame Förderung von Bund und Ländern auf der Grundlage von Art. 91 b Absatz 1 GG verweisen: <https://www.gwk-bonn.de/themen/finanzierung-von-wissenschaft-und-forschung/finanzierungsuebersicht/>

Mit freundlichen Grüßen
Rebekka Kötting

Stellvertretende Generalsekretärin der
Gemeinsamen Wissenschaftskonferenz (GWK)
Friedrich-Ebert-Allee 38
53113 Bonn
Tel.: 0228/5402122
E-Mail: koetting@gwk-bonn.de
www.gwk-bonn.de

Gesendet: Montag, 13. Februar 2017 um 12:52 Uhr
Von: "Kind, Uwe" <Uwe.Kind@uba.de>
An: "k.saller@gmx.de" <k.saller@gmx.de>
Betreff: Ihre Anfrage an das Umweltbundesamt: Feinstaub

Sehr geehrte Frau Saller,

besten Dank für Ihre Anfrage.

Wir haben alle Informationen zum Thema auf unserer Website zusammengefasst – hier werden auch Veröffentlichungen genannt:

Allgemein: www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub

Gesundheit: www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-der-bevoelkerung-in-deutschland#textpart-1

Wir hoffen, Ihnen hiermit weitergeholfen zu haben.

Mit freundlichen Grüßen
im Auftrag

Uwe Kind

Z4 / Bürgerservice, Besucherdienst, Veranstaltungen
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Telefon: +49 (0)340 2103 2130
uwe.kind@uba.de
/// www.umweltbundesamt.de ///

Gesendet: Freitag, 21. Juni 2019 um 09:34 Uhr
Von: "Koetting, Rebekka" <Koetting@gwk-bonn.de>
An: "KatjaSa@gmx.de" <KatjaSa@gmx.de>
Betreff: AW: Rückfragen Register Forschungsförderung

Sehr geehrte Frau Saller,

bezüglich Ihrer Fragen kann ich seitens der GWK lediglich auf die über unsere Homepage abrufbare Übersicht über die Gemeinsame Förderung von Bund und Ländern auf der Grundlage von Art. 91 b Absatz 1 GG verweisen: <https://www.gwk-bonn.de/themen/finanzierung-von-wissenschaft-und-forschung/finanzierunguebersicht/>

Mit freundlichen Grüßen
Rebekka Kötting

Rebekka Kötting
Stellvertretende Generalsekretärin der
Gemeinsamen Wissenschaftskonferenz (GWK)
Friedrich-Ebert-Allee 38
53113 Bonn
Tel.: 0228/5402122
E-Mail: koetting@gwk-bonn.de
www.gwk-bonn.de

Gesendet: Donnerstag, 09. Februar 2017 um 07:57 Uhr
Von: "Rolle, Karl-Heinz" <k.rolle@fz-juelich.de>
An: "Katja Sailer" <KatjaSa@gmx.de>
Betreff: AW: Forschungsprojekte zum Thema Feinstaub

Sehr geehrte Frau Sailer,

vielen Dank für Ihre Anfrage an die Förderberatung „Forschung und Innovation“ des Bundes.

Die Förderberatung informiert zu Fördermöglichkeiten für Forschung und Entwicklung. Für Ihre Fragestellung müssten Sie andere Beratungs- und Informationsmöglichkeiten nutzen. Im Folgenden möchte ich Ihnen eine Auswahl nennen:

Für die Förderung auf Bundesebene haben Sie den Förderkatalog als Recherchemöglichkeit für geförderte Projekte.

Für die Landesförderung ist mir keine zentrale Recherchemöglichkeit bekannt. In der Regel werden von den Landesfördereinrichtungen nur beispielhaft Projekte auf deren Seiten dargestellt. In diesem Fall müssen Sie die Landesfördereinrichtungen ansprechen.

Die Nationalen Kontaktstellen (NKS) verfügen unter Umständen Listen zu geförderten Projekten aus den Forschungsrahmenprogrammen.

Ich hoffe, ich konnte Ihnen mit der Nennung einiger Rechercheansätze weiterhelfen.

Mit freundlichen Grüßen
Karl-Heinz Rolle

Förderberatung "Forschung und Innovation" des Bundes
Forschungszentrum Jülich GmbH, PtJ
Zimmerstraße 26-27
10969 Berlin

Tel.: 030 20199-419
Fax: 030 20199-470
Gebührenfreie Hotline: 0800 2623-008
E-Mail: k.rolle@fz-juelich.de
Internet: <http://www.foerderinfo.bund.de>

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Katja Saller, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

Schützt die 39. BImSchV vor Feinstaub? Sonderfall Pflegeheime

Protects the 39th BImSchV from particulate matter? Nursing homes as a special case

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/ innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/ der Erstbetreuer/ in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, um meinem Doktorvater Prof. Dr. em. Horst Skarabis herzlich zu danken. Er hat mich dabei unterstützt, die Doktorarbeit neben Beruf und Familie und trotz der, wegen des Corona Lockdown zum Teil widrigen Umstände zu realisieren und hat mir mit großer Geduld, Motivationsschüben, Anregungen und Unterstützung zur Seite gestanden.

Außerdem danke ich der Reply AG und namentlich Herrn Anian Leistner für ihre Offenheit gegenüber einer weitgehend fachfremden Dissertation und ihre Unterstützung. Ohne die mehrfach völlig unbürokratisch ermöglichten, vielen Wochen unbezahlten Urlaubs hätte ich die notwendige Ruhe für die Ausarbeitung der Dissertation nicht finden können.

Darüber hinaus gilt mein Dank Frau Dr. Silvia Pietschmann und Frau Silke Hagenbruch aus dem Promotionsbüro für ihre Geduld und Unterstützung bei der Erfüllung der formalen Anforderungen.

Und nicht zuletzt danke ich besonders meinem Lebensgefährten und meinen Kindern für ihren stetigen Glauben an mich. Sie haben mir Kraft und Rückhalt gegeben, den Spagat zwischen Familie, Beruf und Doktorarbeit letztlich doch zu bestehen.



CharitéCentrum für Human- und Gesundheitswissenschaften

Charité | Campus Charité Mitte | 10117 Berlin

Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBikE)

Direktor: Prof. Dr. Frank Konietschke

Name, Vorname: Saller, Katja
Emailadresse: katja.saller@charite.de
Matrikelnummer: 226538
Promotionsbetreuer: Prof. Dr. Nils Lahmann
Promotionsinstitution / Klinik: Klinik für Geriatrie und Altersmedizin

Postanschrift:
Charitéplatz 1 | 10117 Berlin
Besucheranschrift:
Reinhardtstr. 58 | 10117 Berlin
Tel. +49 (0)30 450 562171
frank.konietschke@charite.de
<https://biometrie.charite.de/>



Bescheinigung

Hiermit bescheinige ich, dass Frau *Katja Saller* innerhalb der Service Unit Biometrie des Instituts für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBikE) bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben wahrgenommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- Termin 1: 26.04.2022

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Die Arbeit gibt eine umfassende Übersicht über die gesundheitlichen Auswirkungen der Luftbelastung durch Feinstaub, sowie deren gesetzlicher Eindämmung. Auswertung von Daten und eine damit verbundene Anwendung statistischer Methoden waren für die Erstellung der Arbeit nicht notwendig.

Diese Bescheinigung garantiert nicht die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren und die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie übernimmt hierfür keine Haftung.

Datum: 26.04.2022

Name des Beraters: Konrad Neumann

Unterschrift BeraterIn, Institutsstempel

