

# Emissionen aus kleinen Verbrennungsmotoren

I3

JENS CORDES, BENNO STOFFELS, EGILL ANTONSSON & FURKAN SAKI

## Zusammenfassung

Das Dezernat I3 des HLNUG hat im Rahmen des Projekts „CLEANAIRMM“, das durch das LIFE-Programm der Europäischen Union gefördert wurde, Emissionsmessungen an kleinen Verbrennungsmotoren durchgeführt. Im Fokus standen dabei Bau- und Gartengeräte, die unter die „NRMM-Verordnung“ der EU fallen. Ziel war es, festzustellen,

welche Schadstoffmengen diese Geräte im realen Betrieb tatsächlich freisetzen und somit durch die Verwendung von Elektrogeräten, die mit einem mobilen Stromspeicher betrieben werden, eingespart werden können. Es zeigte sich, dass die Emissionen in vielen Fällen die Grenzwerte der NRMM-Verordnung überschreiten.



**Abb. 1:** Einige typische NRMM: Rasenmäher, Motorsäge, Laubbläser und Dieselgenerator

## NRMM - Non-Road Mobile Machinery

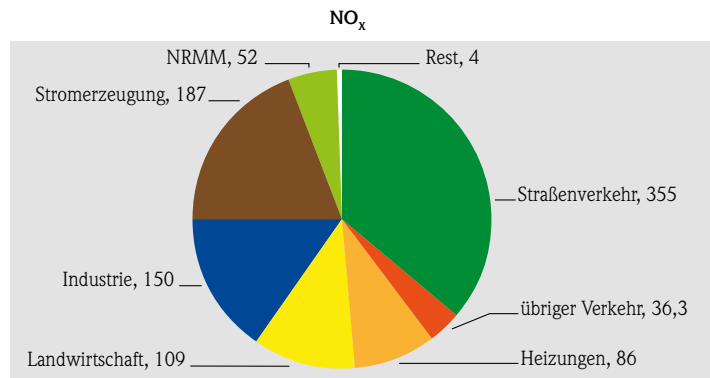
Mit „NRMM“ (Non-Road Mobile Machinery) werden Geräte und Maschinen bezeichnet, die einen Verbrennungsmotor haben, aber nicht für den Straßenverkehr bestimmt sind. Typische NRMM sind Bau- und Gartengeräte, wie z. B. Generatoren, Motorsägen, Laubbläser oder Trennschleifer.

Die Emissionen von gas- und partikelförmigen Schadstoffen dieser NRMM sind teilweise enorm, wie Vergleiche mit Fahrten mit einem neueren PKW (2) veranschaulichen:

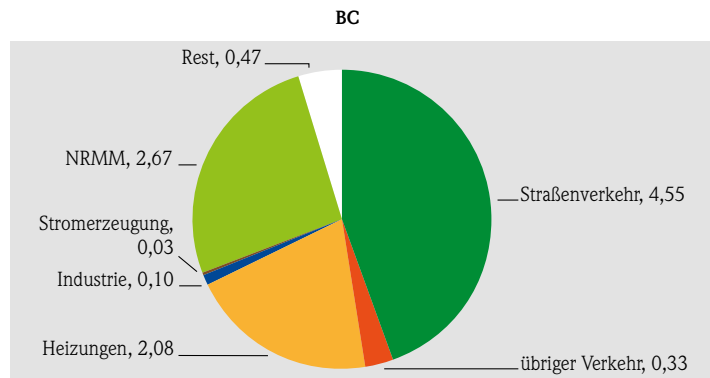
- Eine Stunde Rasenmähen verursacht vergleichbar viele Schadstoffemissionen wie eine Autofahrt über ca. 500 km (z. B. von Frankfurt nach Hamburg, Innsbruck oder Prag)
- Eine Stunde Laubblasen verursacht vergleichbar viele Schadstoffemissionen wie eine Autofahrt über ca. 1 800 km (z. B. von Frankfurt nach Madrid, Bukarest oder Kyiv).

Insgesamt sind die Emissionen der NRMM (3) nicht unerheblich und übertreffen teilweise die Emissionen aus anderen Bereichen. So waren diese Geräte z. B. im Jahr 2020 für Emissionen von mehr als 52 000 t (Tonnen) Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ) in Deutschland verantwortlich, was die Summe der Emissionen des gesamten Eisenbahn-, Schiffs- und Flugverkehrs (36 300 t) deutlich überstieg (siehe Abb. 2).

Noch deutlich größer ist der Anteil der NRMM an den Emissionen von „Black Carbon“ (BC). Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Ruß, wie er z. B. bei unsauberer Verbrennung von Kohle oder Erdölprodukten (vor allem Diesel) entsteht (4). Hier betrug im Jahr 2020 der Anteil der NRMM mit insgesamt mehr als 2 670 t über 26 Prozent der Gesamtemissionen in Deutschland (siehe Abb. 3).



**Abb. 2:**  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Deutschland im Jahr 2020. Angaben in Kilotonnen (kt, 1 000 Tonnen) mit Zuordnung zu verschiedenen Verursachern



**Abb. 3:** Black Carbon-Emissionen in Deutschland im Jahr 2020. Angaben in Kilotonnen (kt, 1 000 Tonnen) mit Zuordnung zu verschiedenen Verursachern

Zu den weiteren Schadstoffen, die durch NRMM in die Atmosphäre freigesetzt werden, zählen Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ , 307 000 t, 12,5 Prozent der Gesamtemissionen in Deutschland), flüchtige organische Stoffe (ohne Methan, NMVOC, 25 300 t, 2,4 Prozent), sowie Staub (TSP, 4 290 t, 1,3 Prozent), praktisch ausschließlich in Form von Feinstaub ( $\text{PM}_{2,5}$ , 4 280 t, 5,3 Prozent), wovon wiederum mehr als die Hälfte in Form von Black Carbon emittiert wird (siehe oben). Zu beachten ist bei diesen Zahlenangaben, dass die Emissionen von Eisenbahnen und Schiffen – anders als in der NRMM-Verordnung (5) – jeweils gesondert betrachtet und nicht den NRMM zugeordnet wurden.

## Emissionsgrenzwerte für kleine Verbrennungsmotoren

Die Emissionen aus NRMM werden seit Anfang 2017 durch die Verordnung (EU) 2016/1628 (5) („NRMM-Verordnung“) geregelt. Damit wurden Grenzwerte für die Schadstoffemissionen dieser Geräte, sowie ein Verfahren zur Typprüfung festgelegt. Die Verordnung definiert für verschiedene Einsatzbereiche von Verbrennungsmotoren Motorkategorien, Emissionsgrenzwerte, Anforderungen an die Haltbarkeit und Einführungszeitpunkte für die neuen Regelungen. Die Verordnung unterscheidet dabei zwischen folgenden Motorenklassen:

- **NRG:** Motoren von Stromgeneratoren mit einer Leistung von mehr als 560 kW
- **NRSh:** Handgehaltene Geräte mit Fremdzündungsmotor (z. B. mit Benzin oder Gas betrieben) mit einer Leistung von weniger als 19 kW (z. B. Laubbläser, Motorsägen, Trennschleifer und andere Garten- und Baumaschinen)
- **NRS:** Fremdzündungsmotoren mit einer Leistung von weniger als 56 kW (und nicht zu NRSh gehörend, z. B. kleinere Benzin-Generatoren)
- **IWP/IWA:** Motoren zum Antrieb von Binnenschiffen (IWP) oder als Hilfsaggregat (IWA)
- **RLL/RLR:** Motoren zum Antrieb von Lokomotiven (RLL) oder Triebwagen (RLR)
- **SMB:** Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Motorschlitten
- **ATS:** Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Geländefahrzeugen oder Quads
- **NRE:** Motoren von nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten, die zu keiner der übrigen Motorenklassen gehören (z. B. Bagger, Traktoren und andere Bau- oder Erntemaschinen, sowie die meisten mit Diesel betriebenen Motoren)

Damit umfasst die Verordnung sehr unterschiedliche Maschinen und Geräte, die aber alle zwei Kriterien erfüllen: Alle NRMM besitzen einen Verbrennungsmotor und dienen nicht (primär) dazu, Passagiere oder Waren auf Straßen zu transportieren. In der Definition der NRMM-Verordnung schließt dies folglich auch Lokomotiven und Schiffe mit ein, welche in unserem Projekt allerdings keine Rolle gespielt haben. Die meisten im Bau- und Gartenbereich eingesetzten NRMM besitzen die Motorklassen NRSh (Handgeräte mit Benzinmotor), NRS (z. B. Stromgeneratoren mit Benzinmotor) oder NRE (andere Geräte, vor allem mit Dieselmotor) im unteren Leistungsbereich. Für diese Geräte sieht die NRMM-Verordnung Emissionsgrenzwerte für Kohlenstoffmonoxid (CO), die Summe aus Kohlenwasserstoffen und Stickstoffoxiden (HC + NO<sub>x</sub>) und die Partikelmasse (PM) vor, die sich je nach Motorenart drastisch unterscheiden (siehe Tabelle 1).

Die Grenzwerte sind jeweils auf die Leistung des Motors bezogen. So darf z. B. eine Motorsäge mit einem 2,0 PS-Motor (NRSh) bei voller Leistung (1,5 kW) bis zu 1 207 g Kohlenstoffmonoxid und 75 g Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide (addiert) pro Stunde ausstoßen. Für einen Dieselgenerator mit einer Leistung von 3 kW (NRE) wären bei voller Auslastung zwar nur 24 g Kohlenstoffmonoxid und 22,5 g Kohlenwasserstoffe/Stickstoffoxide, dafür aber ganze 1,20 g Staub pro Stunde zulässig, wobei letzterer vor allem als Feinstaub ausgestoßen wird. Streng genommen beziehen sich die genannten Grenzwerte allerdings – genau wie im Fahrzeugbereich – auf die Emissionen an einem Prüfstand bei Durchführung eines in der Verordnung genau beschriebenen Testzyklus, und nicht auf den Einsatz unter realen Bedingungen.

**Tab. 1:** Emissionsgrenzwerte gemäß NRMM-Verordnung für ausgewählte Motoren(unter)klassen

Motoren(unter)klasse	CO [g/kWh]	HC + NO <sub>x</sub> [g/kWh]	PM [g/kWh]
NRSh (bis 50 cm <sup>3</sup> Hubraum)	805	50	– <sup>(1)</sup>
NRS (80–225 cm <sup>3</sup> Hubraum)	610	10	– <sup>(1)</sup>
NRE (bis 8 kW)	8,00	7,50	0,40 oder 0,60 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Kein Grenzwert festgelegt <sup>(2)</sup> Für luftgekühlte Motoren mit Direkteinspritzung und Handstarter

## Das LIFE-Programm der Europäischen Union

Das „Finanzierungsinstrument für die Umwelt“ oder „L'Instrument Financier pour l'Environnement“ (LIFE) wurde 1992 zur Unterstützung von Umweltschutzprojekten geschaffen (1). In seiner ersten Phase (LIFE I: 1992–1995) verfügte das Programm über ein Budget von 400 Millionen ECU (European Currency Units, der Vorläufer des Euro), mit dem 731 Umweltprojekte finanziert werden konnten. Der Umfang der Förderung wuchs im Laufe der Zeit stetig an (LIFE II: 1996–1999, 450 Mio. ECU, 865 Projekte; LIFE III: 2000–2006, 640 Mio €, 1 157 Projekte; LIFE+: 2007–2013, 2,1 Mrd €, 1403 Projekte, LIFE 2014–2020: 3,4 Mrd €). Im aktuellen Förderzeitraum steht eine Fördersumme von insgesamt 5,45 Mrd € zur Verfügung, um Programme in den Bereichen

- Natur und Biodiversität
- Kreislaufwirtschaft und Lebensqualität
- Eindämmung des Klimawandels und Anpassung an den Klimawandel
- Übergang zu sauberer Energie



**Abb. 4:** Logo des LIFE-Programms der EU (1). Das hier beschriebene Projekt (LIFE CLEANAIRMM – LIFE18 ENV/DE/000054) wurde durch das LIFE-Programm finanziell unterstützt

zu fördern. Im Rahmen des EU LIFE-Projekts „Piloting clean power supply devices in construction and urban green care to reduce emissions from portable machines (CLEANAIRMM)“ (6), das in Kooperation mit einem Start-Up für tragbare Batteriesysteme entstand, erhielt das HLNUG von 2019 bis 2022 Fördermittel zum Aufbau eines Prüfstands für Emissionsmessungen an NRMM.

## NRMM-Emissionsmessungen des HLNUG

Das HLNUG hat im Rahmen des EU-LIFE geförderten Forschungsprojekts „CLEANAIRMM“ einen Messstand für NRMM entwickelt und konstruiert, um den realen und stark variierenden Emissionsausstoß dieser Geräte zu charakterisieren. Damit können wir nun zuverlässig die Emissionen von gasförmigen Schadstoffen wie Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), aber auch von partikelförmigen Emissionen bis zum UFP-Bereich (ultrafeine Partikel) in Form von Partikelmasse und Partikelanzahlkonzentration ermitteln. Mit Hilfe des Messstands werden die Abgasemissionen direkt am Auspuff der Verbrennungsmotoren gemessen.

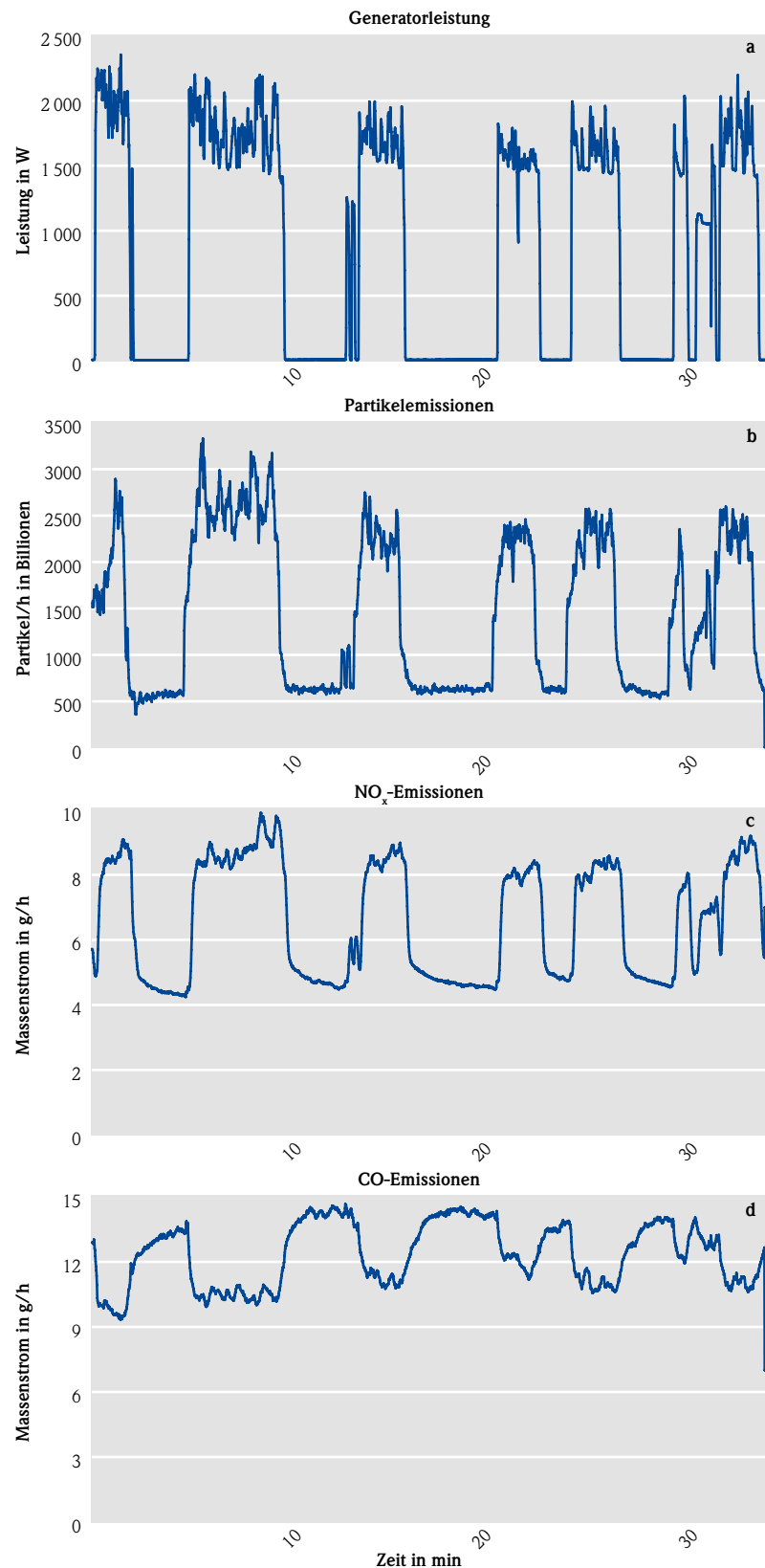
Ein Beispiel für eine Messreihe in diesem Projekt ist die folgende Untersuchung einer Baustellentätigkeit mit einem Dieselgenerator:

Mittels eines Systems zur Messung der Leistungsaufnahme wurden Lastprofile typischer Tätigkeiten auf einer Baustelle aufgezeichnet. Mit diesen Profilen wurden anschließend am Messstand über eine programmierbare elektronische Last ein Dieselgenerator belastet und währenddessen Abgasparameter und Emissionen ermittelt. In Abbildung 5 (a) ist das Profil der Arbeit mit einer Sanierfräse dargestellt. Es wurden jeweils über mehrere Minuten Fräsarbeiten durchgeführt, anschließend mehrere Minuten gewartet. Im Betrieb benötigt das Gerät eine elektrische Leistung von etwa 1,5–2 kW. Die Unterschiede in der Leistung entsprechen verschiedenen Arbeits-

schritten mit der Sanierfräse. In der Abbildung sind ebenfalls die gemessenen Emissionen von  $\text{NO}_x$  und die Anzahl an emittierten Partikeln dargestellt. Über die elektronische Last abgerufen emittiert der Dieselgenerator im Vollastbetrieb über 2 Billionen Partikel und etwa 8–9 Gramm Stickstoffoxide in der Stunde, aber auch im Leerlauf zwischen den einzelnen Tätigkeiten werden mit etwa 600 Billionen Partikeln und 5 Gramm Stickstoffoxiden pro Stunde noch nennenswerte Mengen emittiert. Die CO-Emissionen zeigen ein umgekehrtes Verhalten: Hier werden im Vollastbetrieb 10–11 Gramm Kohlenmonoxid pro Stunde ausgestoßen, im Leerlauf jedoch bis zu 15 Gramm pro Stunde.

Umgerechnet auf die abgerufene elektrische Leistung hat der Dieselgenerator in dieser Untersuchung 7,7 g/kWh  $\text{NO}_x$  sowie  $1,7 \cdot 10^{15}$  Partikel/kWh (1,7 Billionen Partikel pro Kilowattstunde) ausgestoßen. Für die Partikelanzahlkonzentration wurde für diese Motorenklasse (NRE, < 8 kW) kein Grenzwert festgelegt. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen alleine überschreiten hier bereits den Grenzwert von 7,5 g/kWh für die Summe aus Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen, auch die CO-Emissionen überschreiten mit 14,5 g/kWh den Grenzwert von 8 g/kWh deutlich.

Bei den von uns durchgeführten Messungen an verschiedenen Diesel- und Benzingeneratoren wurden die erlaubten Emissionen für  $\text{NO}_x$  und HC teilweise deutlich überschritten. Die im Rahmen des Projekts gesammelten Daten werden derzeit noch aufbereitet und sollen dann in wissenschaftlichen Fachzeitschriften im Open Access-Format veröffentlicht werden.



**Abb. 5:** (a) Leistung eines Dieselgenerators. Die Variationen in der Emission von (b) Partikeln, (c)  $\text{NO}_x$  und (d) CO als Funktion der Leistung des Generators sind gut zu erkennen

## Marktüberwachung

Zum Schutz der Verbraucher ist im Rahmen der Marktüberwachung eine Typgenehmigung der NRMM notwendig, bevor diese zum Verkauf angeboten werden dürfen. Bei dieser Typgenehmigung durchläuft das Produkt zunächst eine Reihe von Tests, zu denen auch (genau wie bei PKW) Emissionsmessungen zur Kontrolle der Grenzwerteinhalten gehören. Die Marktüberwachung der NRMM in Deutschland ist in der 28. BImSchV („Verordnung zur Durchführung der unionsrechtlichen Verordnung über Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte“ (7)) geregelt, welche die Zuständigkeit für die meisten Geräte den Bundesländern überträgt. Auch hier wurden aber Eisenbahnen (um die sich das Eisenbahn-Bundesamt kümmert) und Schiffe (für welche die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt zuständig ist) gesondert behandelt. Im Bundesland Hessen sind für die Marktüberwachung nach 28. BImSchV bzw. NRMM-Verordnung die Umweltabteilungen der drei hessischen Regierungspräsidien Darmstadt, Gießen und Kassel zuständig.

Die Emissionsmessungen im Rahmen der Typgenehmigung werden von privaten Laboratorien im Auftrag und auf Kosten der Gerätehersteller durchgeführt. Eine systematische Überprüfung der Emissionswerte der anschließend auf den Markt gebrachten NRMM durch eigene Messungen der Marktüberwachungsbehörden findet in Deutschland bislang nicht statt. Wie nicht zuletzt der Abgasskandal im PKW-Bereich (8) gezeigt hat, sind unabhängige Emissionsmessungen bei der Marktüberwachung aber ein wichtiges Mittel, um den Schutz der Verbraucher und der Umwelt wirklich sicherzustellen. Der Messstand des HLNUG hat das Potential, in einem weiteren Schritt von der Forschungsarbeit zur Marktüberwachung weitentwickelt zu werden und somit eine unabhängige Marktüberwachung im Bereich der NRMM zu ermöglichen.

## Literatur

- (1) Nähere Informationen zum LIFE-Programm der EU sind im Internet zu finden unter: [https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en)
- (2) California Air Resources Board (2021): Small Off-Road Engines Fact Sheet. Im Internet: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/sore-small-engine-fact-sheet>
- (3) Siehe Nationales Emissionskataster gemäß CLRTAP-Konvention, abrufbar im Eionet Central Data Repository der European Environment Agency: <https://cdr.eionet.europa.eu/de/un/clrtap/inventories/>
- (4) TOENGES-SCHULLER, N., SCHNEIDER, C., ZIMMERMANN, T. & TEBERT, C. (2020): Black Carbon Emissionen; Dessau-Roßlau (Umweltbundesamt). Im Internet: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/black-carbon-emissionen>
- (5) Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September 2016 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG. Im Internet: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/2022-07-17>
- (6) Piloting clean power supply devices in construction and urban green care to reduce emissions from portable machines (LIFE CLEANAIRMM – LIFE18 ENV/DE/000054). Im Internet: <https://instagrid.co/cleaner-air-project>
- (7) Achtundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Durchführung der unionsrechtlichen Verordnung über Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte – 28. BImSchV) vom 21. Juli 2021 (BGBl. I S. 3125). Im Internet: [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_28\\_2021/](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_28_2021/)
- (8) BORGEEST, K. (2021): Manipulation von Abgaswerten: Technische, gesundheitliche, rechtliche und politische Hintergründe des Abgasskandals; Wiesbaden (Springer Vieweg).

