

Die neue TRGS 554 „Abgase von Dieselmotoren“ – Hinweise zur Anwendung

W. Neumann, D. Dahmann, T. Ehrhard, B. Flemming, R. Hebisch, E. Nies, R. Rühl, U. Spod, C. Ziegler, G. Zikoridse

Zusammenfassung Die vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) überarbeitete und 2019 veröffentlichte Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 554 „Abgase von Dieselmotoren“ weist eine Reihe von Änderungen gegenüber der bisherigen Fassung auf. So wurden insbesondere wegen der Festlegung neuer Arbeitsplatzgrenzwerte neben den partikulären Dieselrußpartikeln auch die Stickoxide – Stickstoffmonoxid und -dioxid – berücksichtigt. Die in der Motorentechnik und der Abgasnachbehandlung erfolgten technischen Weiterentwicklungen fanden ebenfalls ihren Niederschlag. In dieser Veröffentlichung werden einige erläuternde Hinweise zur praktischen Anwendung dieser TRGS geliefert.

The new TRGS 554 “Exhausts of diesel engines” – Advice for its application

Abstract The Technical Rule for Hazardous Substances (TRGS) “Exhausts of diesel engines” was revised by the German Hazardous Substance Committee (AGS) and published in 2019. Especially, the new occupational exposure limits (OELs) for diesel engine emissions, and nitric oxide and nitrogen dioxide required this revision. Additionally, new developments in engine technology and exhaust after treatment have been considered. This publication is aimed to help the user of this TRGS in practice.

1 Einleitung

Der Einsatz von dieselmotorenbetriebenen Fahrzeugen, Maschinen und Geräten ist im Arbeitsalltag weitverbreitet. Der Dieselmotor findet mobil oder stationär, im Freien, in Hallen oder unter Tage bei ganz unterschiedlichen Einsatzbedingungen und Leistungen Verwendung. Er ist in vielen Arbeitsbereichen wie z. B. Baubetrieben, Handwerk, Transport und Ver-

kehr, Tunnelbau, Bergbau, Landwirtschaft, Schifffahrt, Schienenverkehr und stationären Anwendungen, etwa bei der Notstromversorgung, anzutreffen. Ungeachtet aller gegenwärtig laufenden Diskussionen und der Probleme der Abgasbelastungen ist der Dieselmotor in absehbarer Zeit in vielen Fällen wohl kaum zu ersetzen. Daher werden wir uns auch in den nächsten Jahren an Arbeitsplätzen mit Abgasen von Dieselmotoren auseinandersetzen und geeignete Schutzmaßnahmen für die Beschäftigten bei Tätigkeiten mit Dieselmotoren treffen müssen.

In der alten Fassung der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 554 „Abgase von Dieselmotoren“ von 2008 [1] standen – historisch bedingt – die krebserzeugenden partikelförmigen Dieselmotoremissionen (DME) als der kritische Gefahrstoff im Mittelpunkt. Einen Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) gab es nicht. Die TRGS war daher durch das Minimierungsgebot für krebserzeugende Stoffe geprägt. Andere Abgaskomponenten spielten noch eine untergeordnete Rolle. Weiterentwicklungen im Gefahrstoffrecht brachten im Jahr 2016 neue AGW für Stickstoffmonoxid (NO) von 2,5 mg/m⁵ (2 ppm) und Stickstoffdioxid (NO₂) von 0,95 mg/m⁵ (0,5 ppm) [2]. Sie stellten eine deutliche Absenkung gegenüber den bis 2004 geltenden Luftgrenzwerten dar. Im Jahr 2017 wurde ein AGW für die nach wie vor als krebserzeugend eingestuften DME (Dieselrußpartikel als elementarer Kohlenstoff, kurz: EC) von 0,05 mg/m⁵ in der alveolengängigen Fraktion [2] festgelegt. Dies machte eine Überarbeitung der TRGS 554 unausweichlich.

2 Die Struktur der neuen TRGS 554

Neben der inhaltlichen Neufassung wurde die TRGS 554 [3] auch neu strukturiert. Sie besteht jetzt aus fünf Abschnitten, wobei der Abschnitt „Arbeitsmedizinische Prävention“ neu hinzukam. Die Anzahl der Anlagen reduzierte sich von fünf auf drei. Die Begründung liegt darin, dass sich die ehemalige Anlage 1 „Verzeichnis betrieblicher Arbeitsbereiche mit Abgasen von Dieselmotoren“ aus der gültigen Gefahrstoffverordnung ergibt und die Anlage 5 „DME-Konzentrationen – Messergebnisse für Arbeitsbereiche“ durch den neuen AGW für DME verzichtbar wurde. Nachfolgend wird auf die einzelnen Abschnitte eingegangen.

2.1 Anwendungsbereich und Begriffsbestimmungen

Die neue TRGS 554 [3] gilt für Tätigkeiten in allen Arbeitsbereichen, in denen Abgase von Dieselmotoren in der Luft an Arbeitsplätzen auftreten können. So wurde klargestellt, dass sie nicht nur für Tätigkeiten in ganz oder teilweise geschlossenen Räumen, sondern auch für Tätigkeiten im Freien gilt.

Seit seiner Einführung hat der Begriff „Dieselmotoremissionen“ – ausschließlich für den partikelförmigen Anteil der Abgase – zu Verständnisschwierigkeiten geführt. In die TRGS 554 wird der Begriff „Dieselrußpartikel“ gemäß der Definition nach TRGS 900 [2] neu eingeführt und die komplexe Zusammensetzung der Abgase ist nun differenzierter

Dipl.-Ing. Wolfram Neumann, Dipl.-Ing. Björn Flemming,
Berufsgenossenschaft Verkehr, Hamburg.

Dr. rer. nat. Dirk Dahmann,

Institut für Gefahrstoff-Forschung der Berufsgenossenschaft
Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI), Bochum.

Dr.-Ing. Tobias Ehrhard,

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA),
Frankfurt am Main.

Dr. rer. nat. Ralph Hebisch,

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA),
Dortmund.

Dr. rer. nat. Eberhard Nies,

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Dr. rer. nat. Reinhold Rühl, Dipl.-Ing. Ulf Spod,

Dipl.-Ing. (FH) Corinne Ziegler,

Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Frankfurt am
Main.

Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse,

Förderkreis Abgasnachbehandlungstechnologien für
Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FAD), Dresden.

zu betrachten. So spielt der partikuläre Teil der Abgase nicht mehr in allen Fällen die quantitativ dominante Rolle. Verstärkt rücken bei der Bewertung die Stickoxide in den Vordergrund. Die Bezeichnung des AGW nach TRGS 900 bleibt weiterhin „Dieselmotoremissionen (DME)“; gemessen wird aber der elementare Kohlenstoff.

Für ganz oder teilweise geschlossene Arbeitsbereiche wurde die räumliche Umschließung präziser gefasst. Hier gab es in der Praxis unterschiedliche Auslegungen. So gilt nun ein Arbeitsbereich als teilweise geschlossen, sobald ein Dach oder eine Decke und mindestens zwei Wände (auch mit Öffnungen, wie Türen/Tore, Fenster/Dachreiter) vorhanden sind. Für Bauarbeiten im Freien gibt es in der Anlage 1 eine zusätzliche Hilfestellung.

Neben den bereits in der Vorgängerversion beschriebenen Abgasnachbehandlungssystemen beschreibt die neue TRGS sogenannte DeNO_x-Systeme. Dabei handelt es sich um Abgasnachbehandlungssysteme zur Verminderung der Emissionen von Stickoxiden (NO_x). Der Begriff leitet sich aus der UNECE¹⁾ Richtlinie Nr. 132 [4] ab. In der Vorgängerversion dieser TRGS spielte die Minderung von Stickoxiden keine herausragende Rolle.

2.2 Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung

Sind Beschäftigte an Arbeitsplätzen bei ihren Tätigkeiten Abgasen von Dieselmotoren ausgesetzt, müssen bei der Gefährdungsbeurteilung das Ausmaß dieser Belastungen sowie die erforderlichen Schutzmaßnahmen dokumentiert werden. Dabei sind Höhe und Dauer der inhalativen Exposition, die Arbeitsbedingungen und die Gefährdung Dritter zu berücksichtigen. Für die erforderlichen Schutzmaßnahmen ist eine Festlegung bezüglich ihrer Wirksamkeitsprüfung notwendig.

Bei der Anwendung der TRGS 554 tritt die Vermutungswirkung ein und erleichtert somit die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung. Man kann also davon ausgehen, dass die in der Gefahrstoffverordnung gestellten Anforderungen an die Sicherstellung von Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten bei Tätigkeiten in Arbeitsbereichen, in denen Abgase von Dieselmotoren freigesetzt werden, grundsätzlich erfüllt sind. Hingegen müssen bei Abweichungen gleichwertige Schutzmaßnahmen getroffen, begründet und dokumentiert werden.

2.2.1 Einstufung und Kennzeichnung

Emissionen, die bei der Verbrennung von Dieselmotoren freigesetzt werden, sind ein komplexes Gemisch aus gas- und partikelförmigen Komponenten in unterschiedlichen Anteilen. Die Gasphase besteht insbesondere aus Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefeloxiden sowie Aldehyden. Daneben bilden sich durch unvollständige Oxidation des organischen Materials Rußpartikel aus unlöslichen Kernen elementaren Kohlenstoffs (elemental carbon = EC) und daran angelagerten weiteren Substanzen, z. B. polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Diese, als organischer Kohlenstoff (OC) bezeichneten thermisch desorbierbaren Stoffe, sind für die Gefährdungsbeurteilung im Allgemeinen nicht relevant.

Aus toxikologischer Sicht kommt NO, NO₂ und den festen Dieselmotoremissionen eine besondere Bedeutung zu. NO ist ein mäßig reaktives Molekül mit einem ungepaarten Elektron. Es wird auch im menschlichen Organismus als Botenstoff gebildet, der u. a. gefäßerweiternde Wirkung hat. NO₂ ist ein klassisches Reizgas. Im Tierexperiment führten beide Stickoxide zu Schädigungen der Lunge. Die in Deutschland verbindlichen AGW [2] sind auch epidemiologisch durch Studien an vor allem durch Dieselmotoremissionen belasteten Arbeitsplätzen begründet.

Die Rußpartikel sind ursächlich mit der krebserzeugenden Wirkung von DME in Verbindung zu bringen. Untersuchungen an Ratten zeigten, dass beim Krebsentstehungsmechanismus der Partikeleffekt des Rußkerns im Vordergrund steht, während der Beitrag der daran adsorbierten Stoffe, wie PAK und Nitroaromaten, quantitativ vernachlässigbar ist. Als kritischer Gesundheitseffekt gilt eine partikelbedingte Entzündung in der Lunge, die bei längerer Dauer zu Tumoren führen kann. Wird eine solche chronische Entzündung vermieden, ist nicht mit einem zusätzlichen Krebsrisiko zu rechnen. Wie in einem ausführlichen Begründungspapier [5] dargelegt, kommt der deutsche Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) nach kritischer Auswertung der relevanten wissenschaftlichen Literatur zu dem Ergebnis, dass die Einhaltung eines gesundheitsbasierten AGW für Dieselmotoremissionen von 0,05 mg/m³ (EC) vor der Entstehung chronisch-entzündlicher Prozesse im Lungengewebe schützt und damit eine Reaktionskaskade unterbindet, die letztlich in einen klinisch manifesten Tumor münden könnte. Eine diesbezügliche Anpassung der TRGS 906 [6] ist vorgesehen, steht aber bislang noch aus.

Wird der AGW für Dieselmotoremissionen überschritten oder liegen keine Informationen über die Expositionshöhe vor, sind die exponierten Beschäftigten in einem Expositionsverzeichnis [7] zu führen. In diesem Zusammenhang sind auch Tätigkeiten im Freien in das Expositionsverzeichnis aufzunehmen. Tätigkeiten ohne direkten Umgang mit Dieselmotoren am Arbeitsplatz, z. B. ein Büroarbeitsplatz an einer Straße, müssen nicht in das Verzeichnis aufgenommen werden.

Bei Auftreten von Kohlenstoffmonoxid (CO) kann eine fruchtschädigende Wirkung auch bei Konzentrationen unterhalb des AGW [3] nicht ausgeschlossen werden. Dies ist unter Beachtung des Mutterschutzgesetzes in der Gefährdungsbeurteilung besonders zu berücksichtigen. Eine große Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der arbeitsmedizinischen Beratung zu.

2.2.2 Expositionsbeurteilung und Bewertungsindex

Werden Tätigkeiten ausgeübt, bei denen die Beschäftigten gleichzeitig gegenüber mehreren Stoffen exponiert sind, so ist gemäß TRGS 402 [8] die Exposition im Schichtmittel anhand des Bewertungsindex zu beurteilen, der sich aus den Schichtmittelwerten der Einzelstoffe dividiert durch den jeweiligen AGW errechnet. Für kurzzeitig erhöhte Expositionen oberhalb des AGW (Kurzzeitwerte, Spitzenbegrenzung) wird kein Bewertungsindex ermittelt.

In Analogie zum Allgemeinen Staubgrenzwert werden Dieselmotoremissionen nicht im Bewertungsindex berücksichtigt. Für Dieselmotoremissionen erfolgt eine Beurteilung nur durch Vergleich mit dem AGW in Höhe von 0,05 mg/m³.

Schwieriger stellt sich die Situation bei der Beurteilung der Exposition gegenüber NO und NO₂ dar. Sofern keine ande-

¹⁾ UNECE: The United Nations Economic Commission for Europe, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa

ren Quellen für diese beiden Stoffe vorliegen, sind sie nicht im Bewertungsindex zu berücksichtigen, sondern separat in Relation zu ihren jeweiligen AGW zu beurteilen. Liegen dagegen weitere Quellen für eine Exposition vor, z. B. infolge von Spreng- oder Schweiß Tätigkeiten, so ist die darauf zurückführbare Exposition im Bewertungsindex zu berücksichtigen. Messtechnisch ist jedoch keine Unterscheidung möglich, wenn die Stickoxide gleichzeitig aus verschiedenen Quellen herrühren. Unter gewissen Umständen besteht die Möglichkeit, diese Belastungen näherungsweise zu ermitteln, indem z. B. während der Messungen keine Dieselmotoren betrieben werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Stickoxidexposition aus anderen Quellen gemäß TRGS 402 [8] mit nichtmesstechnischen Verfahren zu ermitteln. Man muss sich allerdings darüber im Klaren sein, dass bei „falsch-positiver“ Einbeziehung von Stickoxiden aus anderen Quellen, also bei Überschätzung dieser Belastungen, dies sehr schnell zu einer Überschreitung des Bewertungsindex in Höhe von 1 führen kann. Dadurch würden möglicherweise (jedenfalls gemäß TRGS 554) weitere dieselabgasspezifische Schutzmaßnahmen erforderlich, die in einem solchen Fall nicht angemessen wären.

Werden weitere Tätigkeiten mit Gefahrstoffen ausgeführt, so sind diese – mit Ausnahme der alveolengängigen und der einatembaren Staubfraktion – in der Regel in den Bewertungsindex einzubeziehen.

2.2.3 Erhöhte Exposition

Für Dieselrußpartikel ist keine Spitzenbegrenzung nach TRGS 900 [2] definiert. Damit gilt entsprechend TRGS 402 [8], dass in der Summe während maximal einer Stunde pro Schicht eine Expositionskonzentration bis zum Achtfachen des AGW zulässig ist. Dabei ist der AGW für die Schichtdauer einzuhalten. Für NO und NO₂ sind die Spitzenbegrenzungen gemäß TRGS 900, d. h. für eine 15-minütige Exposition bis zum Doppelten des AGW, mit den entsprechenden Abständen zwischen den Phasen erhöhter Exposition einzuhalten. Bei NO ist auch eine längere Überschreitungsdauer nach den Kriterien der TRGS 900 zulässig.

Insbesondere beim Vorbeifahren von Dieselfahrzeugen können kurzzeitige Expositionsspitzen auftreten. Diese werden nicht gesondert beurteilt, sondern sind bei den Kurzzeitbetrachtungen innerhalb der Kriterien der Spitzenbegrenzung zu berücksichtigen. So sind beispielsweise beim Vorbeifahren eines Dieselfahrzeugs in einer unmittelbar daneben liegenden Halle NO-Konzentrationen oberhalb des doppelten AGW, d. h. > 5 mg/m³, möglich. Dabei handelt es sich nicht um eine Grenzwertüberschreitung, solange die Einhaltung des 15-Minuten-Mittelwertes von 5 mg/m³ sichergestellt ist.

Treten in vergleichbaren Arbeitsbereichen bei vergleichbaren Tätigkeiten unterschiedlich hohe Expositionen unterhalb des AGW auf, so sind diese nicht als erhöhte Exposition im Sinne der TRGS 900 [2] zu betrachten. Für die Beurteilung der inhalativen Exposition nach TRGS 402 [8] sollten solche höheren Expositionen jedoch Anlass sein, die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen zu überprüfen. Dazu können dann auch die nach 4.3.1 (5) der TRGS 554 [5] zusätzlich zu gewährenden Erholungs- und Pausenzeiten zählen.

2.2.4 Messproblematik

Die Messung von Dieselrußpartikeln, die als elementarer Kohlenstoff (EC) bestimmt werden, erfolgt über die Sammlung als alveolengängige Staubfraktion (A-Staub) und anschließende coulometrische Bestimmung nach dem Messverfahren 2 der DGUV Information 213-544 [9] oder entsprechend MAK Collection [10]. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass im ersten Analysenschritt der organische Kohlenstoff (OC) entsprechend den Vorgaben abgetrennt wird, um nicht fälschlich Mehrbefunde für EC zu erhalten.

Da das zu verwendende Messverfahren unspezifisch ist und alle als A-Staub erfassbaren kohlenstoffhaltigen Partikel sammelt, ist vorab zu klären, ob eine entsprechende Messung sinnvoll und realisierbar ist. Anderenfalls könnten numerische Überschreitungen des AGW resultieren, die nicht auf Dieselrußpartikel zurückzuführen sind. Dies ist z. B. der Fall, wenn Ruße, Grafitelktroden, Bremsbeläge oder Papier hergestellt werden oder wenn Papier recycelt wird.

Für NO und NO₂ gibt es zurzeit keine empfohlenen Messverfahren für Arbeitsplatzmessungen [11]. Zur Ermittlung der Konzentration in der Arbeitsplatzluft werden direkt anzeigende Messgeräte eingesetzt. Am leistungsstärksten, allerdings nicht personengetragen nutzbar, sind Messgeräte, die als Messgröße die Chemilumineszenz messen. Für personengetragene Messungen kommen mit elektrochemischen Sensoren ausgestattete Gaswarngeräte zum Einsatz. Bei derartigen Messgeräten ist sicherzustellen, dass sie vor den Messungen auf geeignete Weise kalibriert wurden. Ebenso sind mögliche Querempfindlichkeiten gegenüber anderen in der Arbeitsplatzluft auftretenden Stoffen zu berücksichtigen. Eine Unterscheidung von gleichzeitig auftretendem NO und NO₂ aus verschiedenen Quellen ist mit solchen Messgeräten nicht möglich.

2.3 Schutzmaßnahmen

Im Abschnitt zu Schutzmaßnahmen erfolgte eine Neugestaltung. Schutzmaßnahmen – in der Vorgängerversion in unterschiedlichen Abschnitten beschrieben – sind nun durch das STOP-Prinzip (S = Substitution, T = Technische, O = Organisatorische und P = Persönliche Schutzmaßnahmen) zusammengefasst.

Bei der Substitutionsprüfung, insbesondere bei der Neuanschaffung, stehen emissionsfreie oder emissionsärmere Antriebstechniken im Vordergrund. Kommen weiterhin Dieselmotoren zum Einsatz und ist die Substitutionsmöglichkeit ausgeschöpft, sind technische Schutzmaßnahmen wie die Verwendung von Dieselmotoren, die den neuesten Abgasnormen entsprechen, die Nachrüstung von Abgasnachbehandlungssystemen (Partikelfilter und/oder DeNOx-Systeme) von älteren Dieselmotoren, die Absaugung der Abgase direkt an der Entstehungsstelle sowie andere lufttechnische Maßnahmen geboten.

Selbst die neueste Abgasnachbehandlung gewährleistet keine vollständige Beseitigung schädlicher Abgaskomponenten. Wie im Folgenden erläutert, ist mit höheren Stickoxidemissionen dann zu rechnen, wenn der Dieselmotor nicht das erforderliche Temperaturfenster zur Abgasnachbehandlung von Stickoxiden mittels SCR-Katalysator²⁾

²⁾ SCR, engl.: Selective Catalytic Reduction

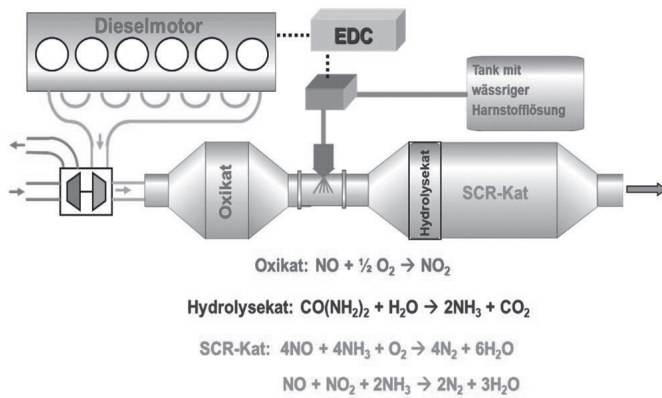


Bild 1. Prinzipschema eines SCR-Katalysators.

(siehe Abschn. 2.3.1) erreicht. Kraftfahrzeuge mit überdimensionierter Motorleistung können dieses Temperaturfenster nur schwer erreichen.

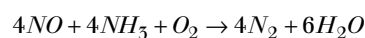
2.3.1 SCR-Katalysator

Zur Reduzierung der Stickstoffoxide (NO_x) hat sich das SCR-Verfahren als technische Lösung durchgesetzt. Bei SCR-Katalysatoren erfolgt die NO_x -Umsetzung mithilfe des Reduktionsmittels Ammoniak. Das Mitführen von Ammoniak in Fahrzeugen oder mobilen Arbeitsmaschinen ist allerdings aufgrund der Gesundheitsgefährdung unzulässig. Daher erfolgt in diesen Anwendungsbereichen die Ammoniakherzeugung an Bord mithilfe von wässriger Harnstofflösung, die als „AdBlue“ bezeichnet wird. Diese Harnstofflösung wird aus einem kleinen Tank in den Abgasstrom gespritzt. Nach der Verdampfung entstehen Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Ammoniak (NH_3). Im dahinter angeordneten SCR-Katalysator geschieht dann die Umwandlung der Stickoxide (NO und NO_2) durch Ammoniak zu Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O). Ein limitierender Faktor für die Aktivität des SCR-Verfahrens bei niedrigen Temperaturen liegt in der On-Board-Produktion des Reduktionsmittels NH_3 aus wässriger Harnstofflösung. Die dafür erforderliche Temperatur liegt derzeit oberhalb der Abgastemperatur von ca. 220 °C. Weiterhin hängt die Niedrigtemperaturfunktionalität des SCR-Katalysators von der Erzeugung von ausreichend NO_2 im Abgasstrang ab, da die auf Platin oder Palladium basierenden Oxidationskatalysatoren erst ab ca. 220 °C eine ausreichende Aktivität zeigen.

Die Optimierung der Tieftemperaturfunktionalität des SCR-Katalysators steht im Mittelpunkt der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Abgasnachbehandlung für Verbrennungskraftmaschinen. Bild 1 zeigt das Prinzipschema eines SCR-Katalysators.

Die selektive katalytische Reduktion der Stickoxide (NO_x) kann grundsätzlich nach dem Standard- oder dem sogenannten schnellen SCR-Verfahren erfolgen:

1. Standard-SCR (Abgastemperatur über 250 °C):



2. Schnelle SCR (Abgastemperatur über 220 °C, „Fast SCR“)



Bei beiden Verfahren setzt sich Ammoniak mit den Stickoxiden in einer Synproportionierungsreaktion zu Stickstoff und Wasser um.

2.3.2 Dieselpartikelfilter für mobile Maschinen

Um die Anforderungen der europäischen Emissionsgesetzgebung für mobile Maschinen einzuhalten, können dieseltreibende Maschinen – abhängig von der Emissionsstufe – bereits ab 19 kW Leistung mit einem Dieselpartikelfilter (DPF) ab Werk ausgerüstet sein. Diese DPF sind in der Regel selbstregenerierend, d. h. der Abbrand des Dieselrußes erfolgt durch aktive oder passive Regeneration direkt im Filter. Bei einigen Systemen kann es erforderlich sein, dass der DPF in regelmäßigen Abständen manuell von Ascheablagerung befreit wird, d. h. extern nach Herstellerangaben gereinigt werden muss.

Bei der Nachrüstung von Maschinen, die nicht ab Werk mit einem DPF ausgestattet sind, ist grundsätzlich darauf zu achten, dass keine neuen Gefahrenquellen (wie heiße Oberflächen, Sicht einschränkung oder Schwächung der tragenden Teile der Maschine) geschaffen werden. Je nach Anwendungsfall kommen aktiv oder passiv selbstregenerierende DPF, deren Regeneration während des Betriebs der Maschine automatisch stattfindet, oder extern zu regenerierende DPF zum Einsatz. Die selbstregenerierenden DPF müssen ggf. analog zu den ab Werk installierten DPF nach Bedarf von den Ascheablagerungen befreit werden. Diese Reinigung kann nach Herstellervorgaben und unter Beachtung der gesetzlich vorgeschriebenen Umwelt- und Arbeitsschutzbedingungen auch mit einfachen Hilfsmitteln wie Hochdruckreiniger oder Druckluft erfolgen.

Bei den extern zu regenerierenden Filtern, bei denen ein interner Abbrand des Dieselrußes nicht vorgesehen ist, sind deutlich höhere Anforderungen an Umwelt- und Arbeitsschutz zu stellen. Für die Regeneration dieser Filter kommen in der Regel folgende Varianten infrage:

- Brennofen,
- Reinigungsanlagen oder Reinigungskabinen,
- Einschicken des Filters zum Hersteller oder Anbieter von Dieselpartikelfilterreinigung.

Zwar sind hierbei ggf. auch Hochdruckreiniger oder Druckluft an der Reinigung beteiligt, dann aber in der Regel in geschlossenen Anlagen oder Kabinen, die die Reinigungsrückstände auffangen.

Hinweise wie

- „Einfache Reinigung mit Hochdruckreiniger“,
- „Bei der Reinigung mittels Hochdruckreiniger wird der auf dem Filter gesammelte Ruß abgespült.“ oder
- „Filtereinsatz kann einfach per Hochdruckreiniger gereinigt werden.“

können dabei schnell einen falschen Eindruck erwecken und suggerieren, dass die Filtereinsätze im Freien oder in der Werkstatt am Waschplatz mit Ölabscheider offen mit einem Hochdruckreiniger gesäubert werden können. Im Falle von extern zu regenerierenden Filtern werden bei unsachgemäßer Reinigung Umwelt und Beschäftigte gefährdet. Zudem kann bei einer nicht sachgerechten Reinigung der Filtereinsatz beschädigt werden. Die von der TRGS 554 geforderte Abscheiderate von über 90 % wird dann nicht mehr eingehalten.

Also muss festgehalten werden, dass sich Betreiber von Nachrüstfiltern sehr detailliert über den Typ des verbauten Filters und die vom Hersteller vorgegebenen Wartungs-

anleitungen informieren müssen. Pauschale Reinigungshinweise – z. B. auf Rechnungen oder Lieferscheinen – sind nicht ausreichend. Die sich daraus ableitenden Anforderungen an den Umwelt- und Arbeitsschutz sind zwingend einzuhalten.

2.3.3 Kraftstoff für Dieselmotoren

Moderne Kraftstoffe, wie z. B. synthetische Kraftstoffe, versprechen eine Reduzierung schädlicher Abgasinhaltsstoffe (Dieselrußpartikel und Stickoxide). Die jeweiligen Hersteller der Dieselmotoren müssen sie für die Verwendung freigeben, um Beschädigungen der katalytischen Schichten in der Abgasnachbehandlung zu vermeiden.

In ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen ist der Einsatz von Pflanzenölen als Kraftstoff weiterhin nicht zulässig.

2.3.4 Wartungs- und Überwachungskonzept für Dieselmotoren

Grundsätzlich sind Dieselmotoren von Maschinen und Fahrzeugen nach den Vorgaben des Herstellers zu warten. Dies gilt jetzt auch beim Einsatz im Freien. Für die Wirksamkeitskontrolle eines fest eingebauten DPF kann sowohl die Schwärzungszahl als auch die Trübungsmessung angewendet werden. Die Genauigkeit beider Messverfahren ist zwar stark von der Zusammensetzung der Rußpartikel abhängig, aber die erzielbare Güte der Messung ist ausreichend für die Funktionskontrolle der DPF.

In der Neufassung der TRGS 554 heißt es: *„Bei fest eingebautem Dieselpartikelfilter ist die Schwärzungszahl bzw. der Trübungswert vor und hinter der Filteranlage zu bestimmen. Auf die Bestimmung vor der Filteranlage kann verzichtet werden, wenn die nach der Filteranlage gemessene Schwärzungszahl nicht mehr als 0,5 bzw. der Trübungswert nicht mehr als $0,15 \text{ m}^{-1}$ beträgt.“*

Zur Messung der Schwärzungszahl wird das Lichtreflexionsverfahren angewandt, um eine Aussage über die Rußemission im Abgas zu bekommen. Dabei wird ein bestimmtes Volumen dem Abgas entnommen und über einen speziellen Filter gesaugt. Die Messgröße ist dabei die Filterschwärzung, die aus der Lichtreflexion vor und nach der Filterbeladung ermittelt wird. Ihr Wert kann zwischen 0 und 10 liegen. Es besteht eine Korrelation der Schwärzungszahl mit der Rußkonzentration im Abgas („MIRA-Korrelation“), allerdings ist die Güte dieses Zusammenhangs stark von der Zusammensetzung der Rußpartikel abhängig. Die Trübungsmessung mit dem Opazimeter ist eine Möglichkeit zur kontinuierlichen Überwachung des Rauchgases. Dabei wird die Lichtschwächung zwischen einer Lichtquelle und einem Empfänger gemessen. Die Trübung des Messgases wird nach dem Lambert-Beerschen Gesetz berechnet. Dabei wird die Intensität der elektromagnetischen Strahlung in einem Medium – hier ein mit Partikeln beladenes Abgas – geschwächt. Die Trübung wird über den Absorptionskoeffizienten mit der Einheit m^{-1} bewertet.

2.3.5 Abgasabsaugungen

Abgasabsaugungen müssen mit Unterdruck arbeiten und so gestaltet sein, dass sie die Abgase an der Austrittsstelle möglichst vollständig erfassen. Eine Neuerung im Regelwerk besteht darin, dass die Abgase aus dem Arbeitsbereich ins Freie abzuleiten sind und eine Störung oder ein Ausfall der Abgasabsauganlage für die Beschäftigten erkennbar sein muss. Dazu können z. B. optische oder akustische Sig-

nale dienen. Dahinter muss sich keine aufwendige Technik verbergen. So kann die geforderte Erkennbarkeit durch ein simples mechanisches Anzeigesystem (Unterdruckzeiger, Membrananzeige grün/rot wie bei einem Staubsauger etc.) erreicht werden oder auch durch einen elektrischen Signalgeber in Verbindung mit einer Signallampe. Wichtig dabei ist, dass die Signalinformation für die Beschäftigten sichtbar ist. Analoges gilt für akustische Signale.

2.4 Organisatorische Schutzmaßnahmen

2.4.1 Abgrenzung und Kennzeichnung von Arbeitsbereichen

Die Anforderungen an ganz oder teilweise geschlossene Arbeitsbereiche, in denen Überschreitungen des AGW für Dieselrußpartikel auftreten können, wurden präzisiert. Sie sind von anderen Arbeitsbereichen vorrangig durch bauliche oder lufttechnische Maßnahmen voneinander zu trennen und durch Anbringung der Verbotsschilder „Zutritt für Unbefugte verboten (D-P006)“, „Essen und Trinken verboten (P022)“ und „Rauchen verboten (P002)“ kenntlich zu machen.

Neu in der TRGS ist die Hygienemaßnahme, dass Beschäftigte, die mit kontaminierten Arbeits- und Betriebsmitteln (z. B. Austausch von DPF, Reinigung von Ablagerungen etc.) umgehen, angemessene Möglichkeiten bekommen, verschmutzte Hautpartien zu reinigen.

2.4.2 Betriebsanweisung und Unterweisung, Betrieb von Dieselmotoren

An der Verpflichtung des Arbeitgebers, eine arbeitsplatzbezogene schriftliche Betriebsanweisung in verständlicher Form und Sprache zu erstellen und anhand der Betriebsanweisung über auftretende Gefährdungen und entsprechende Schutzmaßnahmen mündlich zu unterweisen, hat sich nichts geändert.

Vorgaben zu Verhaltensweisen beim Betrieb von Dieselmotoren, z. B. unnötigen Fahr- und Leerlaufbetrieb sowie starkes Beschleunigen zu unterlassen, blieben gegenüber der alten TRGS 554 unverändert.

2.5 Persönliche Schutzausrüstung

Eine abgestufte, konzentrationsabhängige Verwendung von Atemschutz gibt es in der neuen TRGS 554 nicht. Als Kriterium gelten die AGW. Danach dürfen Tätigkeiten oberhalb des neuen AGW für DME von $0,05 \text{ mg/m}^3$ nur mit Atemschutz durchgeführt werden. Bei der Auswahl ist zu berücksichtigen, dass der Schutz insbesondere gegenüber Dieselrußpartikeln und Stickoxiden gewährleistet sein muss.

2.6 Arbeitsmedizinische Prävention

Die TRGS 554 erhielt ein neues Kapitel zur arbeitsmedizinischen Prävention. Es umfasst in drei Abschnitten die Beteiligung des Betriebsarztes an der Gefährdungsbeurteilung und Erkenntnisse aus der arbeitsmedizinischen Vorsorge, die arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung im Rahmen der Unterweisung sowie die arbeitsmedizinische Vorsorge. Diese Abschnitte sind durch die arbeitsmedizinischen Regeln (AMR) 3.2 [12] geprägt und beziehen sich insbesondere auf die relevanten Abgaskomponenten.

2.7 Die Anlagen zur TRGS 554

In der neuen TRGS 554 erhielten die Anlagen einen neuen Aufbau und ihre Anzahl wurde von fünf auf drei reduziert.

(1) Bauarbeiten in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen im Sinne dieses Abschnitts dieser TRGS sind Arbeiten, die

1. in Hallen, die ein Dach bzw. eine Decke und mindestens zwei Außenwände (auch mit Öffnungen, wie Türen/Tore, Fenster/Dachreiter) haben,
2. in Tiefgaragen oder anderen unter Erdgleiche befindlichen Räumen, die nicht als Bauarbeiten unter Tage gelten,
3. in Zelten und Einhausungen, die ein Dach und mindestens zwei Außenwände haben,
4. in fertiggestellten Tunnelbauwerken,
5. in Schächten oder Baugruben mit einer Grundfläche < 100 m²,
6. in Gräben und grabenähnlichen Arbeitsräumen, die mehr als schulertief sind, oder
7. in Räumen durchgeführt werden.

Bild 2. Definition von ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen in Anhang 1 Nr. 3.2 der TRGS 554.

(1) Bauarbeiten im Freien im Sinne dieser TRGS sind Arbeiten, die

1. nicht in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen,
2. in Schächten oder Baugruben mit einer Grundfläche > 100 m² oder
3. in Gräben und grabenähnlichen Arbeitsräumen, die weniger als schulertief sind

durchgeführt werden.

Bild 3. Definition von Bauarbeiten im Freien in Anhang 1 Nr. 3.1 der TRGS 554.

So entfallen das Verzeichnis betrieblicher Arbeitsbereiche mit Abgasen von Dieselmotoren (ehemalige Anlage 1) und die orientierenden Messergebnisse für Arbeitsbereiche (ehemalige Anlage 5). Die Berechnungen der DME-Konzentration beim Einsatz von Gabelstaplern in Hallen und die Berechnung der Konzentration gas- und partikelförmiger Immissionen in untertägigen Arbeitsbereichen des Bergbaus entfallen ebenso, da die Konzentrationen von Stickoxiden wegen der vielfältigen Einflussgrößen nicht sicher zu berechnen sind.

2.7.1 Ausführungen zu speziellen Arbeitsbereichen und Tätigkeiten

Sechs spezielle Arbeitsbereiche und Tätigkeiten sind in Anlage 1 dargestellt. Für diese sind Schutzmaßnahmen beschrieben, die einen sicheren Arbeitsablauf gewährleisten. Neu hinzugekommen sind die Arbeitsbereiche Bergbau unter Tage und Bauarbeiten. Der Betrieb von Förderanlagen, Ladehallen, Laderampen, Ladestellen und Abkipfstellen, Werkstätten und Prüfstellen von Überwachungsorganisationen sowie Abstellbereiche wurde überarbeitet. Nachfolgend wird auf einige Arbeitsbereiche näher eingegangen.

• Bauarbeiten

Dieselbetriebene Maschinen und Fahrzeuge werden auf zahlreichen Baustellen im Freien, aber auch in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen, wie Hallen, Tiefgaragen oder Tunneln, eingesetzt. Ohne diese Maschinen und Fahrzeuge wären viele Arbeiten auf Baustellen nicht zu bewältigen.

Im Tunnelbau, der zu den Bauarbeiten unter Tage zählt, ist es schon seit vielen Jahren Stand der Technik, dass neben einer technischen Lüftung die dieselbetriebenen Maschinen und Fahrzeuge mit einem DPF ausgestattet sein müssen. Bis vor wenigen Jahren war dagegen der Einsatz derartiger Maschinen und Fahrzeuge bei Arbeiten in Hallen oder Tiefgaragen völlig unbekannt.

Ein Grund hierfür war sicherlich, dass im Anhang der letzten Fassung der TRGS 554 lediglich konkrete Schutzmaß-



Bild 4. Betonpumpe in einer Halle mit Absaugung am Auspuff.

nahmen bei Tunnelbauarbeiten beschrieben waren. Der Anhang 1 der neuen TRGS 554 behandelt nun die Bauarbeiten in kompletter Breite. Hier wird klar definiert, was unter Bauarbeiten in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen verstanden wird (**Bild 2**) und welche Schutzmaßnahmen zur Einhaltung der AGW für Dieselrußpartikel und Stickoxide getroffen werden müssen.

Erstmals werden in der Neufassung der TRGS 554 auch Bauarbeiten im Freien beschrieben (**Bild 3**), bei denen aufgrund der Einhaltung der AGW keine weiteren Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) hat zahlreiche Messungen bei Betonierarbeiten in Hallen und Tunneln, bei denen ausschließlich straßenzugelassene Betonmischer mit EURO-V-Motoren eingesetzt wurden, durchgeführt. Kam eine dieselbetriebene Betonpumpe zum Einsatz, wurden die Abgase direkt am Auspuff mit einer Absaugung erfasst und ins Freie abgeleitet (**Bild 4**).

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass – obwohl die Fahrzeuge keine Dieselpartikelfilter haben – der AGW für Dieselrußpartikel eingehalten wird. Das ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass die bei Bauarbeiten eingesetzten Fahrzeuge mit Straßenzulassung – anders als z. B. eine Erdbaumaschine – nicht über längere Zeit unter Vollast betrieben werden, sondern diese in der Regel nur zum Ent- und Beladen in die ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereiche einfahren. Daher sind bei Bauarbeiten in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen straßenzugelassene Fahrzeuge mit EURO-V-Motoren auch ohne DPF zulässig. Die Fahrzeuge mit Motoren der derzeit gültigen Abgasstufe EURO VI erfüllen die Forderungen der TRGS 554 ohnehin, da diese bereits vom Hersteller, neben der SCR-Anlage zur Reduktion der Stickoxide, auch mit einem DPF ausgestattet werden.

Eine Einhaltung des AGW für Dieselrußpartikel zeigen auch die Messungen beim Einsatz von Maschinen und Fahrzeugen ohne DPF ebenerdig im Freien. Bei der Ausführung von Bauarbeiten im Freien sind daher keine weiteren Schutzmaßnahmen im Hinblick auf die Gefährdungen durch Abgase von Dieselmotoren erforderlich.

Messungen in nach oben offenen Baugruben und Schächten im Freien zeigen, dass bei einer Grundfläche größer 100 m² beim Einsatz von Baumaschinen ohne DPF der AGW für Dieselrußpartikel eingehalten wird. Baumaschinen können daher in Baugruben und Schächten über 100 m² Grundfläche ohne DPF eingesetzt werden; unter 100 m² sind DPF erforderlich.

Bei simulierten Verdichtungsarbeiten mit dieselbetriebenen Rüttelplatten ohne DPF in einem 1,5 m breiten, 2 m tiefen und 15 m langen Graben im Freien wurde dagegen der AGW für Dieselrußpartikel überschritten. Sind die Rüttelplatten nicht mit einem DPF nachgerüstet, ist beim Einsatz von dieselbetriebenen Rüttelplatten in mehr als schulertiefen Gräben Atemschutz mit Partikelfilter zu tragen.

Des Weiteren hat die BG BAU umfangreiche Messungen der Stickoxidexpositionen auf Tunnelbaustellen durchgeführt. Aus den Ergebnissen konnten für den konventionellen Tunnelbau die Rahmenbedingungen für eine langfristige Einhaltung der AGW für die Stickoxide festgelegt werden. Bei Arbeiten auf anderen Baustellen, z. B. in Hallen, Tiefgaragen oder in Gräben, liegen noch nicht genügend Messungen vor, um eine verbindliche Aussage über die Höhe der Exposition zu treffen.

Die Ergebnisse der Messungen von Dieselrußpartikeln und Stickoxiden sowie die ggf. erforderlichen Schutzmaßnahmen sind in verschiedenen Expositionsbeschreibungen der BG BAU zusammengestellt [13]. Auf diese wird auch in der Neufassung der TRGS 554 verwiesen.

Für den Einsatz mobiler Maschinen der Abgasstufe IV ohne DPF in ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereichen können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden, da die Einhaltung des AGW für Dieselrußpartikel maßgeblich von der eingesetzten Motorleistung, der Maschinenauslastung sowie der Größe des ganz oder teilweise geschlossenen Arbeitsbereiches abhängt. Da für die Messung der Dieselrußpartikel keine direkt anzeigenden Messgeräte auf dem Markt verfügbar sind, ist der Nachweis zur Einhaltung des AGW für Dieselrußpartikel vor dem Beginn der Arbeiten durch Arbeitsplatzmessungen zu erbringen. Aufgrund dieser Unsicherheit, ob der AGW für Dieselrußpartikel tatsächlich eingehalten wird, ist vom Einsatz mobiler Maschinen der Abgasstufe IV ohne DPF abzuraten.

Mittlerweile bieten die Baumaschinenhersteller immer mehr Maschinen mit emissionsfreiem Antrieb – also mit Elektromotoren – an. Diese sind vor allem in beengten und schlecht belüfteten Arbeitsbereichen wie in Räumen und Tiefgaragen vorzugsweise einzusetzen. Gasmotoren zählen zu den emissionsarmen Antriebstechniken.

Eine technische Lüftung als alleinige Schutzmaßnahme bei fehlendem DPF ist auf Baustellen nicht ausreichend. Auf Tunnel- und Gleisbaustellen ist eine technische Lüftung immer als ergänzende Maßnahme zum DPF erforderlich. Die entsprechenden Schutzmaßnahmenkonzepte für diese Bauarbeiten werden im Anhang 1 der TRGS 554 in den Abschnitten 5.3 und 5.4 beschrieben.

- Abstellbereiche, insbesondere für Feuerwehren und Rettungsdienste

In Abstellbereichen von Feuerwehren und Rettungsdiensten fanden umfangreiche Messungen zur Wirksamkeitsüberprüfung verschiedener Schutzmaßnahmen statt [14; 15]. Dabei zeigte sich, dass bei älteren Fahrzeugen die Dieselrußpartikel eher kritisch sind und bei neueren Fahrzeugen die Stickoxide, insbesondere NO. Die in dieser TRGS empfohlene mitlaufende Absaugvorrichtung (**Bild 5**) entfernt, unmittelbar am Auspuff aufgesteckt, alle Abgasbestandteile und sorgt somit für eine Einhaltung der AGW. Als universelle Schutzmaßnahme ist für den Anwender dann irrelevant, welcher Abgasnorm das jeweils betriebene Fahrzeug genügt. Für Abstellbereiche mit nur einem Fahrzeug ist diese Schutzmaßnahme nicht zwingend erforder-



Bild 5. Überprüfung der Wirksamkeit einer mitlaufenden Absaugvorrichtung im Abstellbereich eines Rettungsdienstes.

derlich, wenn sichergestellt wird, dass sich beim Ausfahren und danach niemand im Abstellbereich aufhält und für ausreichende Nachlüftung gesorgt ist. Auch andere Schutzmaßnahmen können zur Anwendung kommen. Im Gegensatz zur mitlaufenden Absaugvorrichtung muss dann jedoch für die Gefährdungsbeurteilung mit im Regelfall einer Messung belegt werden, dass diese Schutzmaßnahme wirksam ist. Für die Querlüftung durch gegenüberliegend geöffnete Hallentore ist das Vorgehen zur Wirksamkeitsüberprüfung beispielhaft in [15] beschrieben.

Für Betreiber anderer Abstellbereiche, z. B. Hallen für Baufahrzeuge, sollte zumindest geprüft werden, ob eine vergleichbare Maßnahme ebenso umgesetzt werden sollte. Dies ist insbesondere dann empfehlenswert, wenn dieselbetriebene Fahrzeuge vor Ausfahrt aus dem Abstellbereich

im Standgas laufen, um die druckluftbetriebene Bremse aufzufüllen.

2.7.2 Betriebsanweisung

Die Anlage 3 zur Betriebsanweisung beschreibt beispielhaft einen Arbeitsbereich, in dem ein Lkw an einer Rampe be- und entladen wird. Die Einsatzmöglichkeiten von Dieselmotoren sind vielfältig und damit auch die unterschiedlich ausgeführten Betriebsanweisungen.

3 Zusammenfassung

Die TRGS 554 wurde überarbeitet und nach Verabschiedung durch den AGS 2019 neu veröffentlicht. Dabei wurde sowohl den neuen AGW für Dieselrußpartikel sowie für NO und NO₂ als auch neuen Entwicklungen der Motorentechnik und Abgasnachbehandlung Rechnung getragen.

Der Anwendungsbereich dieser TRGS wurde für Tätigkeiten im Freien erweitert. Insbesondere erfolgte eine Definition, was unter derartigen Tätigkeiten zu verstehen ist.

Bei Einhaltung des AGW für Tätigkeiten mit DME sind diese nicht mehr als krebserzeugend zu betrachten. Dies bedeutet auch für Arbeitgeber eine Erleichterung dahingehend, dass kein Expositionsverzeichnis nach § 14 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) zu führen ist – aber nur bei Einhaltung des AGW.

Für die ausführlich dargestellten Arbeitsbereiche und Tätigkeiten wurden Schutzmaßnahmen präzisiert und aktualisiert. Breiten Raum nehmen hier Tätigkeiten mit Dieselmotoren auf Baustellen ein.

Literatur

- [1] Technische Regel für Gefahrstoffe: Abgase von Dieselmotoren (TRGS 554). GMBL. (2008) Nr. 56/58, S. 1179-1212; zul. geänd. GMBL. (2009) Nr. 28, S. 604 (diese Fassung ist nicht mehr gültig).
- [2] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). BArbBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. GMBL. (2019) Nr. 7, S. 117-119.
- [3] Technische Regel für Gefahrstoffe: Abgase von Dieselmotoren (TRGS 554). GMBL. (2019) Nr. 6, S. 88-104.
- [4] UNECE Richtlinie No. 132 zur Nachrüstung von Partikel- und NO_x-reduzierenden Abgasnachbehandlungssystemen. Hrsg.: UNECE: United Nations Economic Commission for Europe.
- [5] Begründung des AGW für Dieselmotoremissionen (DME) in TRGS 900 (Fassung vom 26. September 2017). Hrsg.: Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS). www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/900/900-dieselmotorenemissionen-dme-russpartikel-als-ec.pdf
- [6] Technische Regel für Gefahrstoffe: Verzeichnis krebserzeugender Tätigkeiten oder Verfahren nach § 3 Abs. 2 Nr. 3 GefStoffV (TRGS 906). BArbBl. (2005) Nr. 7, S. 79-80; zul. geänd. GMBL. (2007) Nr. 24, S. 514.
- [7] Technische Regel für Gefahrstoffe: Expositionsverzeichnis bei Gefährdung gegenüber krebserzeugenden oder keimzellmutagenen Gefahrstoffen der Kategorien 1A oder 1B (TRGS 410). GMBL. (2015) Nr. 30, S. 587-595.
- [8] Technische Regel für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). GMBL. (2010) Nr. 12, S. 231-253; zul. geänd. GMBL. (2016) Nr. 43, S. 843-846.
- [9] DGUV Information: Analysenverfahren zur Bestimmung von Kohlenstoff im Feinstaub – anwendbar für partikelförmige Dieselmotor-Emissionen in Arbeitsbereichen, Verfahren 02 – Coulometrie (213-544). Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), Berlin 1995.
- [10] Bauer, H.; Dahmann, D.; Fricke, H.; Hebisch, R.; Lehmann, E.; Rentel, K.: Dieselmotoremissionen [Air Monitoring Methods in German language, 2006a]. In: The MAK-Collection for Occupational Health and Safety. doi:10.1002/3527600418.am0diespyrd0015a
- [11] Bewertung von Verfahren zur messtechnischen Ermittlung von Gefahrstoffen in der Luft am Arbeitsplatz. Hrsg.: Ausschuss für Gefahrstoffe. www.baua.de/dok/8562832
- [12] Arbeitsmedizinische Regel: Arbeitsmedizinische Prävention (AMR 3.2). GMBL. (2017) Nr. 7, S. 118-121.
- [13] Abgase von Otto- und Dieselmotoren. Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU), Berlin. www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/gefahrstoffe/abgase-von-otto-und-dieselmotoren/
- [14] Hebisch, R.; Fröhlich, N.; Karmann, J.; Protz, U.: Exposition gegenüber Abgasen von Dieselmotoren in Abstellbereichen für Fahrzeuge von Feuerwehren und Rettungsdiensten – Vergleichende Betrachtung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 77 (2017) Nr. 11/12, S. 473-477.
- [15] Hebisch, R.; Wolf, T.: Abgase von Dieselmotoren in Feuerwehrlhäusern aus Sicht des Arbeitsschutzes. BRANDSchutz Deutsche Feuerwehr-Zeitung 72 (2018) Nr. 6, S. 462-465.