

Möglichkeit zur Umrechnung der Konzentration von einatembarem in alveolengängigen Staub

C. Wippich, D. Koppisch, D. Breuer

Zusammenfassung Zur Bestimmung möglicher Umrechnungsfunktionen der Konzentration von einatembarem (E-Staub) in alveolengängigen Staub (A-Staub) wurden 15 120 Parallelmessungen aus der Expositionsdatenbank MEGA des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) mithilfe der Regressionsanalyse untersucht. E-Staub ist die wichtigste Prediktorvariable und zeigt ein nach der Anzahl der Messpaare korrigiertes Bestimmtheitsmaß (*adj. R²*) von 0,585. Unter Berücksichtigung von Tätigkeit und Material ist es möglich, systematisch unabhängige Gruppen zu bilden. Außerdem wird durch die Kombination dieser beiden Variablen die beste Beschreibung des Datensatzes erreicht (Heißverarbeitung mit metallstaubdominiertem Material; *adj. R²* = 0,706). Mithilfe einer „Trial & Error“-Auswertung können außerdem sieben spezifische, heuristische Gruppen erstellt werden, die für ausgewählte Tätigkeiten und Materialien gelten (*adj. R²* zwischen 0,733 und 0,835): Löten, Gießen, Schweißen, Hochtemperaturschneiden, Strahlen, Meißeln/Bossieren/Stemmen und Drahtziehen. Alle Umrechnungsfunktionen sind Potenzfunktionen mit Exponenten zwischen 0,454 und 0,946. Daraus folgt, dass aus den vorliegenden Daten generell kein linearer Zusammenhang zwischen A- und E-Staub-Konzentration angenommen werden kann.

Means of converting the concentration of inhalable to respirable dust

Abstract In order to determine possible conversion functions from inhalable dust to respirable dust concentration, regression analysis was performed on 15,120 parallel measurements taken from the MEGA exposure database of the Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance (IFA). Inhalable dust is the most important predictor variable, and exhibits a coefficient of determination *adj. R²* corrected for the number of measurement pairs of 0.585. Consideration of the task and material enables independent groups to be formed systematically. Furthermore, combination of these two variables yields the best description of the data set (high temperature processing involving material dominated by metal dust; *adj. R²* = 0.706). A trial-and-error interpretation also enabled seven specific, heuristic groups to be created covering selected tasks and materials (*adj. R²* between 0.733 and 0.835): soldering, casting, welding, high-temperature cutting, blasting, chiselling/bossing and wire drawing. All conversion functions are power functions with exponents of between 0.454 and 0.946. It follows that no linear relationship between respirable and inhalable dust concentration may generally be assumed based upon the available data.

1 Einleitung

Stäube sind in vielen Industriebereichen, beispielsweise Bergbau, Gießereien, Holzverarbeitung oder Steinbearbei-

tung, die vorherrschende Expositionsart. Dabei kann Staub aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt sein, zum Beispiel aus metallischen, mineralischen oder organischen Partikeln, die sich in Größe, Form und Dichte unterscheiden. Abhängig von ihrem aerodynamischen Durchmesser dringen die Partikel unterschiedlich tief in die Atemwege ein und werden in drei Fraktionen unterteilt: einatembare, thorakale und alveolengängige [1 bis 3]. Der Masseanteil der einatembaren Stäube (E-Staub) an der Gesamtheit aller Schwebstoffe in der Luft wird nach internationalen Normen mit folgender Formel berechnet [1; 2]:

$$E = 50 * (1 + \exp[-0,06 * D]), \quad (1)$$

wobei E in Prozent der Anteil der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser D in μm ist. Diese Konvention gilt für $D \leq 100 \mu\text{m}$. Kleinere Partikel mit einem Durchmesser zwischen 10 und 15 μm können bis in die Lungenalveolen gelangen; aus diesem Grund nennt man sie alveolengängig (A-Staub) [2; 4].

Partikel, die nicht ausgeatmet werden können oder über einen längeren Zeitraum in der Lunge verbleiben, können schwere Schäden verursachen, beispielsweise allergische Reaktionen, Pneumokoniose (insbesondere Silikose), Krebs und Herzkrankheiten [5; 5; 6]. Außerdem bergen eingeatmete Partikel ein zusätzliches Gesundheitsrisiko, wenn es sich beispielsweise um Metallstäube handelt und diese giftige Inhaltsstoffe wie Blei oder Nickel enthalten.

Früher wurden in Deutschland hauptsächlich E-Staub-Messungen durchgeführt. Doch mit der Einführung des Feinstaubgrenzwerts im Jahr 1973 [7] und dessen sukzessiver Absenkung erfolgten zusätzlich immer mehr Messungen für A-Staub-Konzentrationen. Zudem finden nach der Einführung von Grenzwerten für Metalle im A-Staub derzeit verstärkt Parallelmessungen beider Fraktionen statt.

Während sich die Bedingungen zur Beurteilung der aktuellen Exposition an den Arbeitsplätzen immer weiter verbessert haben, gestaltet sich die retrospektive Analyse der Höhe der Staubexposition weiterhin problematisch, wenn nur historische Daten zu einer einzigen Fraktion vorliegen. Weitere Probleme ergeben sich bei epidemiologischen Studien, zum Beispiel, wenn Grenzwerte festgelegt werden sollen und nur Konzentrationswerte einer Fraktion vorliegen. Aus diesen Gründen ist eine Möglichkeit zur mathematischen Umrechnung gemessener E-Staub- in A-Staub-Konzentrationen wünschenswert.

Einige bisher veröffentlichte Studien befassen sich bereits mit der Umrechnung von Staubfraktionen in unterschiedlichen Industriezweigen. In den meisten Fällen werden Umrechnungsfaktoren von Gesamtstaub in die E-Fraktion berechnet [8 bis 11] oder Probenahmesysteme verglichen [12 bis 14]. Es gibt bisher nur wenige Studien, die sich mit der Umrechnung von E- in A-Staub-Konzentration befassen. *Dahmann* et al. rekonstruierten die A- und E-Staub-Exposition von Arbeitern in früheren Uranminen. Jedoch wurden hierfür Messungen mit den zu dieser Zeit

Cornelia Wippich, M. Sc.,
Dr. rer. nat. Dorothea Koppisch,
Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Breuer,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Tabelle 1. Probenahmesysteme und verwendete Volumenströme beider Fraktionen während der Parallelmessungen.

E-Staub		A-Staub		n	Probenahmeart
Messgerät*	Volumenstrom in l/min	Messgerät*	Volumenstrom in l/min		
VC-25 G	375	VC-25 F	375	3 788	stationär
VC-25 G	375	PM4-F	66,7	169	stationär
GSP	3,5	FSP-10	10	1 298	stationär
GSP	3,5	FSP-10	10	5 273	personengetragen
GSP	3,5	FSP-2	2	495	personengetragen
GSP-10	10	FSP-10	10	854	stationär
GSP-10	10	FSP-10	10	1 822	personengetragen
GSP-10	10	PM4-F	66,7	155	stationär
PM4-G	66,7	PM4-F	66,7	799	stationär

* Weitere Informationen zu den Probenahmesystemen z. B. in [21; 22]

gebräuchlichen Messsystemen durchgeführt, anstatt die Konzentrationen mathematisch zu berechnen [15]. *Notø* et al. haben einen Umrechnungsfaktor von 0,085 c_A/c_E bei der Zementproduktion bestimmt [16]. Darüber hinaus wurden Staubexpositionen beim Schweißen [17] und an speziellen Arbeitsplätzen in Krematorien [18] untersucht.

Anhand dieser Beispiele wird deutlich, dass die ausgeübten Tätigkeiten und verwendeten Materialien zur Beschreibung des Zusammenhangs der beiden Staubfraktionen wichtig sind. Die meisten Studien nehmen einen linearen Zusammenhang an und bestimmen einen einfachen Umrechnungsfaktor.

In dieser Studie werden Daten aus der IFA-Expositionsdatenbank „Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz“ (MEGA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung ausgewertet, um einen möglichen Zusammenhang zwischen E- und A-Staub-Messungen aufzudecken. Darüber hinaus wird beschrieben, ob weitere Messparameter oder Variablen – wie Tätigkeiten und Material – einen Einfluss auf die Umrechnung der Konzentrationen haben können.

2 Material und Methoden

2.1 Datenauswahl

Die Expositionsdatenbank MEGA enthält unabhängige Datensätze für E- und A-Staub [19]. In dieser Studie werden Daten aus dem Zeitraum zwischen 1961 und 2016 berücksichtigt. Für diese Zeit liegen 105 825 Datensätze für E-Staub und 222 501 Datensätze für A-Staub vor.

Im ersten Schritt wurden Messergebnisse ausgeschlossen, wenn

- die Messdauer kleiner als zwei Stunden ist,
- die gemessene Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt und
- die gemessene Konzentration für E-Staub $>100 \text{ mg/m}^3$ oder für A-Staub $>10 \text{ mg/m}^3$ beträgt.

Diese Ausschlusskriterien wurden gewählt, weil nach der europäischen Norm DIN EN 689:1995 die Anzahl der Messungen, die nötig ist, um eine repräsentative Messung für die Arbeitssituation durchzuführen, von der Messdauer abhängt. Wenn diese $\geq 2 \text{ h}$ ist, genügt eine Messung [20]. Höhere Staubkonzentrationen sind häufig nicht repräsentativ für den betrachteten Arbeitsplatz, sondern spiegeln einen Worst-case-Zustand wider. Aus diesem Grund werden diese von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Im nächsten Schritt werden Paare aus E- und A-Staub-Messungen gebildet, wenn

- die Messungen im selben Betrieb, am selben Tag und zur selben Zeit stattgefunden haben (Start und Ende der Messungen maximal $\pm 5 \text{ min}$),
- Teilbetriebsart, Probenahmeart und Tätigkeit übereinstimmen und
- die A-Staub-Konzentration (c_A) nicht größer als die E-Staub-Konzentration (c_E) ist.

Die Teilbetriebsart beschreibt den Industriezweig, in dem die Messung stattfindet, zum Beispiel im Bergbau, in der Steinbearbeitung oder Gießerei. Die Variable Probenahmeart wird unterteilt in „personengetragen“ und „stationär“.

Aus physikalischer Sicht ist der A-Staub ein Teil des E-Staubes. Aus diesem Grund werden Messungen bei denen $c_A > c_E$ ermittelt wurde, auf eine fehlerhafte Probenahme, räumlich bedingte Variation der Konzentrationen oder Partikelbewegung und thermische Effekte zurückgeführt. Dieses Selektionskriterium betrifft 592 Messwertpaare.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Kriterien ist es möglich, einen Datensatz aus 15 120 parallel gemessenen A- und E-Staub-Konzentrationen zusammenzustellen. Diese Daten stammen aus den Jahren 1989 bis 2016 und wurden in 818 verschiedenen Arbeitsbereichen aufgenommen. Der Großteil der Messungen erfolgte bei einer Messdauer von zwei Stunden ($n = 9\,648$).

2.2 Probenahmesysteme

In Tabelle 1 sind die am häufigsten genutzten Probenahmesysteme zur Messung der E- und A-Staub-Konzentration zusammen mit dem verwendeten Volumenstrom aufgelistet. Alle Messgeräte, die in dieser Studie aufgeführt werden, sind nach den internationalen Normen DIN EN 15205 [23] und DIN EN 1540 [24] validiert. Die Verwendung validierter Messsysteme ist außerdem eine Voraussetzung für die Aufnahme der Messwerte in die Expositionsdatenbank MEGA.

2.3 Statistische und mathematische Methoden

Alle statistischen Auswertungen wurden mit der Software IBM SPSS statistics, Version 23 (Fa. IBM Corp.) durchgeführt. Bei den statistischen Tests handelt es sich um Standardverfahren aus gängiger Fachliteratur [25; 26]. Für alle Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ festgelegt. Die gemessenen Staubkonzentrationen sind lognormalverteilt. In Übereinstimmung mit anderen Studien [17; 27 bis 29] wird aus diesem Grund folgende Korrelation von $\ln(c_A)$ (natürlicher Logarithmus der A-Staub-Konzentration) und

$\ln(c_E)$ (natürlicher Logarithmus der E-Staub-Konzentration) angenommen:

$$\ln(c_A) = k \cdot \ln(c_E) + C_0 \quad (2)$$

k und c_0 geben jeweils die Steigung und den Achsenabschnitt an, die mithilfe der Regressionsanalyse ermittelt werden können. Zusätzlich wird der Standardfehler der angepassten Regressionsfunktion $s_{\text{Fit}}(\ln(c_A))$ angegeben. Dieser wird verwendet, um das Konfidenzintervall der Regressionsfunktion an einem $\ln(c_E)$ bestimmten zu berechnen [50]. Die kleinsten Werte für $s_{\text{Fit}}(\ln(c_A))$ werden am Mittelwert von $\ln(c_E)$ erreicht, die größten Werte an den Extremstellen von $\ln(c_E)$. Aus diesem Grund ist in **Tabelle 2** für $s_{\text{Fit}}(\ln(c_A))$ ein Intervall angegeben.

Gl. (2) kann rücktransformiert werden in:

$$c_A = c_E^k \cdot e^{C_0} \quad (3)$$

Dabei wird ersichtlich, dass c_A gegen 0 tendiert, wenn c_E gegen 0 tendiert. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, da das Selektionskriterium $c_A \leq c_E$ gilt. Darüber hinaus gilt die Annahme eines linearen Zusammenhangs der beiden Variablen, wenn der Wert 1 im 95%-Konfidenzintervall von k liegt.

Es wäre prinzipiell möglich, die Gl. (2) und (3) um weitere lineare Terme wie Material oder Tätigkeiten zu erweitern. Allerdings kann keine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt werden, da dafür alle Variablen unabhängig voneinander sein müssen und in unserem Fall Material und Tätigkeiten nicht unabhängig von c_E sind.

Aus dem Gesamtdatensatz wurden Gruppen aus Tätigkeiten und Material gebildet. Die hierzu nötigen Schritte sind im **Bild 1** dargestellt. Zur Gruppenbildung wurden hauptsächlich Informationen aus der Datenbank verwendet, wie beispielsweise Arbeitsbereich, Tätigkeit oder Materialbezeichnung. Einen zusätzlichen Anhaltspunkt gibt DIN 8580 „Fertigungsverfahren“ [31]. Außerdem wurde der Energieeintrag des Prozesses berücksichtigt (Verwendung hochdrehender, abrasiver Verfahren). Im nächsten Schritt wurden Tätigkeits- und Materialgruppen zusammengeführt (Bild 1). Das Zusammenführen der einzelnen Gruppen erfolgte mithilfe des Games-Howell-post-hoc-Tests, der paarweise Vergleiche der einzelnen Gruppen zulässt und überprüft, ob sich das Verhältnis c_A/c_E in den Gruppen signifikant voneinander unterscheidet.

Zusätzlich zum hier beschriebenen systematischen Weg zur Bildung der Gruppen wurden weitere, sehr spezifische Gruppen aus bestimmten Tätigkeiten und Arbeitsbereichen mittels „Trial & Error“ gebildet, die ein höheres Bestimmtheitsmaß und einen höheren Korrelationskoeffizient als die Schlussgruppen zeigen (Tabelle 2). Die Gruppen wurden erhalten, indem innerhalb der Tätigkeitsgruppen (Gruppen 1 bis 6, Tabelle 2) ähnliche Tätigkeiten mit ähnlichen Regressionskoeffizienten gruppiert wurden. Diese Gruppen wurden als heuristische Gruppen bezeichnet.

Vor einer linearen Regressionsanalyse wurde das Vorliegen der dafür erforderlichen Voraussetzungen geprüft. Die Verteilung der Messwerte in den einzelnen Gruppen wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test (mit Korrektur nach Lilliefors) überprüft [26]. Mittels Histogramm und Kolmogorov-Smirnov-Test oder Shapiro-Wilk-Test [25] wurden die Residuen auf Normalverteilung überprüft. Außerdem

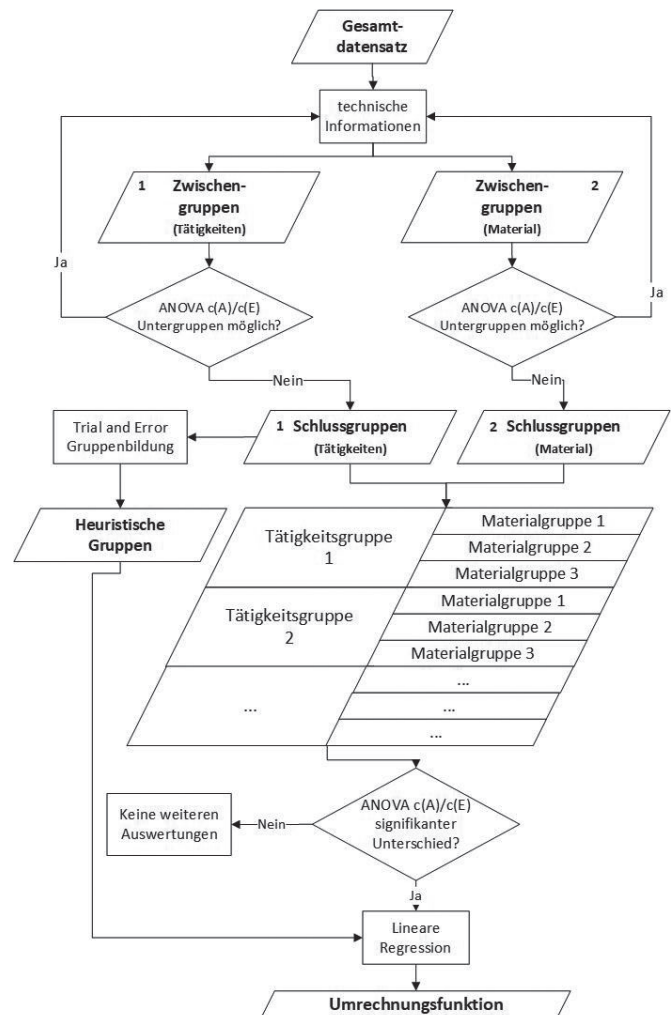


Bild 1. Flussdiagramm zur Gruppenbildung.

wurde grafisch überprüft, dass im Residuenstreuendiagramm kein Muster vorliegt [25]. Zum Ausschluss der Autokorrelation wurde der Durbin-Watson-Test angewendet [25]. Die Güte der Regression wird beschrieben durch den Korrelationskoeffizienten R und das korrigierte Bestimmtheitsmaß $adj. R^2$ [25]:

$$adj. R^2 = R^2 \frac{m}{n - m - 1} (1 - R^2) \quad (4)$$

Dabei gibt m die Anzahl der Variablen und n die Anzahl der Messwertpaare an. Da in dieser Studie $n \gg m$ gilt, ist $adj. R^2 \approx R^2$.

3 Ergebnisse

Die Variablen Probenahmesystem, Probenahmejahr und Probenahmeart haben keinen Einfluss auf das Verhältnis c_A/c_E (Durchführung und Ergebnisse werden aus Platzgründen hier nicht näher ausgeführt).

3.1 E-Fraktion

Bei der linearen Regressionsanalyse von 15 120 Datenpaaren mit der Konzentration des E-Staubes als Prediktorvariable erhält man $k = 0,594$ und $c_0 = -0,990$ für Gl. (2). Das korrigierte Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,585 und der Korrelationskoeffizient bei 0,765 (Tabelle 2). Die Umrechnungsfunktion für den Gesamtdatensatz (vgl. Gl. (3)) lautet damit:

Tabelle 2. Aufstellung aller Gruppen mit den Regressionskoeffizienten k und c_0 und deren Standardfehlern für die Gl. (2) und (3) sowie dem Standardfehler der angepassten Regressionsfunktion (S_{Fit}); Bz. = Bezeichnung.

Bz.	Gruppe	n	R	adj. R ²	C ₀	k	S _{Fit} (ln(C _A))	Umrechnungsfunktion
0	Gesamtdatensatz	15 120	0,765	0,585	-0,990 ± 0,006	0,594 ± 0,004	0,0092 bis 0,0400	$c(A) = c(E)^{0,594} * 0,372$
	Tätigkeiten							
1	Oberflächenbearbeitung	805	0,735	0,540	-1,046 ± 0,024	0,500 ± 0,016	0,0427 bis 0,1396	$c(A) = c(E)^{0,500} * 0,351$
2	Heißverarbeitung	2 974	0,818	0,668	-0,751 ± 0,011	0,729 ± 0,009	0,0184 bis 0,0708	$c(A) = c(E)^{0,729} * 0,472$
3	Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren	3 473	0,791	0,626	-1,093 ± 0,012	0,586 ± 0,008	0,0192 bis 0,0698	$c(A) = c(E)^{0,586} * 0,335$
4	spanende Bearbeitung	4 640	0,776	0,602	-1,031 ± 0,016	0,578 ± 0,013	0,0169 bis 0,0553	$c(A) = c(E)^{0,578} * 0,357$
5	Umformen	1 348	0,774	0,599	-1,037 ± 0,011	0,579 ± 0,007	0,0272 bis 0,1071	$c(A) = c(E)^{0,579} * 0,354$
6	Sonstige	1 880	0,768	0,590	-1,100 ± 0,016	0,593 ± 0,011	0,0275 bis 0,1106	$c(A) = c(E)^{0,593} * 0,333$
	Material							
A	mineralstaubdominiert/Sonstige	9 315	0,785	0,616	-1,058 ± 0,007	0,581 ± 0,005	0,0119 bis 0,0512	$c(A) = c(E)^{0,581} * 0,347$
B	metallstaubdominiert	5 269	0,748	0,559	-0,851 ± 0,010	0,614 ± 0,008	0,0146 bis 0,0531	$c(A) = c(E)^{0,614} * 0,427$
C	faserdominiert	536	0,761	0,578	-1,176 ± 0,031	0,614 ± 0,023	0,0543 bis 0,1977	$c(A) = c(E)^{0,614} * 0,308$
	Kombinationsgruppen							
(1-A)	Oberflächenbearbeitung – mineralstaubdominiert	540	0,756	0,571	-1,043 ± 0,059	0,512 ± 0,038	0,0549 bis 0,1660	$c(A) = c(E)^{0,512} * 0,352$
(2-B)	Heißverarbeitung – metallstaubdominiert	2 265	0,840	0,706	-0,687 ± 0,013	0,759 ± 0,020	0,0268 bis 0,0961	$c(A) = c(E)^{0,759} * 0,503$
(4-A)	spanende Bearbeitung – mineralstaubdominiert	2 632	0,802	0,643	-1,015 ± 0,026	0,595 ± 0,017	0,0227 bis 0,0732	$c(A) = c(E)^{0,595} * 0,362$
(6-B)	Sonstige – metallstaubdominiert	331	0,779	0,608	-0,898 ± 0,068	0,618 ± 0,054	0,0608 bis 0,1910	$c(A) = c(E)^{0,618} * 0,407$
	Heuristische Gruppen							
α	Löten	34	0,917	0,835	-0,559 ± 0,074	0,946 ± 0,073	0,1634 bis 0,4417	$c(A) = c(E)^{0,946} * 0,572$
β	Gießen (Metall)	77	0,877	0,767	-0,430 ± 0,058	0,913 ± 0,049	0,0857 bis 0,2322	$c(A) = c(E)^{0,913} * 0,450$
γ	Sägen (mineralisch)	54	0,933	0,869	-1,064 ± 0,063	0,824 ± 0,044	0,1612 bis 0,4878	$c(A) = c(E)^{0,824} * 0,345$
δ	Schweißen	1 125	0,875	0,766	-0,601 ± 0,018	0,803 ± 0,014	0,0297 bis 0,1005	$c(A) = c(E)^{0,803} * 0,548$
ε	Hochtemperaturschneiden	176	0,897	0,803	-0,716 ± 0,034	0,750 ± 0,028	0,0832 bis 0,2832	$c(A) = c(E)^{0,750} * 0,489$
ζ	Schleifen (mineralisch)	107	0,908	0,824	-0,948 ± 0,061	0,747 ± 0,034	0,1137 bis 0,2617	$c(A) = c(E)^{0,747} * 0,387$
η	Walzen	35	0,925	0,852	-0,763 ± 0,063	0,742 ± 0,053	0,2016 bis 0,5390	$c(A) = c(E)^{0,742} * 0,466$
φ	Strahlen	57	0,907	0,819	-1,107 ± 0,080	0,724 ± 0,045	0,1847 bis 0,4479	$c(A) = c(E)^{0,724} * 0,330$
τ	Meißeln, Bossieren, Stemmen	41	0,912	0,827	-1,264 ± 0,111	0,695 ± 0,050	0,2113 bis 0,4946	$c(A) = c(E)^{0,695} * 0,282$
ν	Drahtziehen	61	0,859	0,733	-1,028 ± 0,087	0,695 ± 0,054	0,1387 bis 0,4000	$c(A) = c(E)^{0,695} * 0,358$
ω	Wiegen (mineralisch)	98	0,875	0,766	-1,059 ± 0,064	0,682 ± 0,039	0,1174 bis 0,3178	$c(A) = c(E)^{0,682} * 0,347$

Tabelle 3. Heuristische Gruppen, ihre Stammgruppen, Materialien, berücksichtigte Arbeitsbereiche und n .

Gruppe	Name	Stammgruppe	Arbeitsbereiche	Material	n
α	Löten	2-B	Hartlöten, Flammlöten; Lichtbogenlöten, MIG-Löten; Weichlöten; Weichlöten, Flammlöten	Metall	34
β	Gießen	2-B	Kaltkammer-Druckgießmaschine oder -anlage; Stranggießmaschine oder -anlage; Warmkammer-Druckgießmaschine oder -anlage	Metall	77
γ	Sägen	4-A	Be- und Nachbearbeitung, Beton sägen; Putzerei, Werkstück sandbehaftet oder vorgeputzt bzw. gestrahlter Sandguss, Trennen mit Trennscheibe oder Sägeblatt; Sägen, nass	Mineralisch	54
δ	Schweißen	2-B	Laserschweißen; Lichtbogenhandschweißen mit umhüllter Stabelektrode; Lichtbogenschweißen, Misch-LB-Verfahren; Metallaktivgas-(MAG)-Schweißen; Metallinertgas-(MIG)-Schweißen; Metall-Schweißen, Mischschweißverfahren; Plasmaschweißen; Schweißen, allgemein; Unterpulverschweißen; Widerstandspunktschweißen; Wolfram-Inertgas-(WIG)-Schweißen	Metall	1 126
ϵ	Hochtemperatur-Schneiden	2-B	Brennschneiden; Laserstrahlschneiden; Plasmaschneiden, allgemein	Metall	176
ζ	Schleifen	4	Putzerei, Werkstück, sandbehaftet und sandfrei, Schleifen mit Handschleifmaschine oder Schleifbock (Einfach- oder Doppelschleifbock); Schleiferei, Poliererei, manuelles Schleifen	Alle Materialien	107
η	Walzen	5-B	Walzen; Walzbetrieb, allgemein;	Metall	35
φ	Strahlen	1	Be- und Nachbearbeitung Putzerei, Strahlen, Strahlmittel Quarzsand, Werkstück sandbehaftet, Raum; Sandstrahlen; Strahlanlagen, trocken, offen	Alle Materialien	57
τ	Meißeln, Bossieren, Stemmen	4-A	Steinhauerei, Bearbeiten mit Bildhauerfeinmeißel von Hand und maschinell; Steinhauerei, Scharrieren, Bossieren, maschinell; Steinhauerei, Stocken von Hand und maschinell; Stemmen, Meißeln; Stocken	Mineralisch	41
ν	Drahtziehen	2-B	Drahtziehen	Metall	61
ω	Wiegen	3-A	Abfüllwaage für Fässer, Hobbocks; Absackwaage, allgemein; Abwiegen von Hand; Anlieferung, Waage; Aufbereitung, Einwiegen der Rohstoffe bei der Glasuraufbereitung; Dosierwaage; Einwiegen der Kleinkomponenten; Glasur-, Fritten- und Farbaufbereitung, Einwiegen von Kleinkomponenten; Mischen, Lagern, Verladen, Waage, Raum; Mischraum, Trockenverarbeitung, Einwiegen der Rohstoffe; Rohstoffe abwiegen, dosieren, umfüllen allgemein und Raum; Sonstige Verfahren zum Abwiegen; Trocknen und Dosieren, Dosierwaage; Verwiegen und Abfüllen von Hand, Kleingebinde; Waagenraum	Mineralisch	98

$$c_A = c_E^{0,594} \cdot e^{-0,990} = c_E^{0,594} \cdot 0,372 \quad (5)$$

Das bedeutet, dass bei einer E-Staub-Konzentration von 1 mg/m^3 eine A-Staub-Konzentration von $0,372 \text{ mg/m}^3$, also ein prozentualer Anteil von 37,2 % zu erwarten wäre. Weil k und damit der Exponent der E-Staub-Konzentration < 1 ist, ist die Umrechnungsfunktion nicht linear. Das hat zur Folge, dass der Anteil der A-Fraktion unter 1 mg/m^3 E-Frak-

tion höher als 37,2 % ist und bei einer E-Staub-Konzentration über 1 mg/m^3 kontinuierlich abnimmt. So ist bei einer E-Staub-Konzentration von 10 mg/m^3 eine A-Staub-Konzentration von $1,46 \text{ mg/m}^3$ und damit nur noch ein prozentualer Anteil von 14,6 % zu erwarten. Zur Veranschaulichung ist die Umrechnungsfunktion des Gesamtdatensatzes mit dem zugehörigen 95%-Konfidenzintervall ohne die Realmessungswerte in **Bild 2** dargestellt.

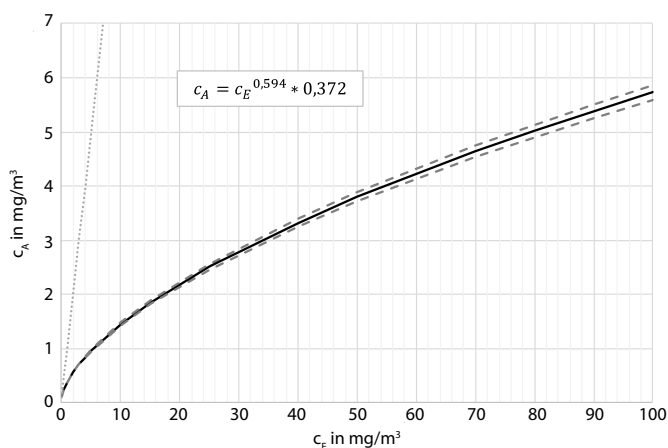


Bild 2. Darstellung der Umrechnungsfunktion für den Gesamtdatensatz mit den Konfidenzintervallen (gestrichelte Linien) und der 1:1-Linie (gepunktete Linie).

3.2 Tätigkeiten

Der Gesamtdatensatz kann in sechs unabhängige Gruppen unterteilt werden:

- Gruppe 1: Oberflächenbearbeitung (z. B. Strahlen, Beschichten, Verzinken ...),
- Gruppe 2: Heißverarbeitung (z. B. Schweißen, Löten, Gießen ...),
- Gruppe 3: Füllen, Sortieren, Lagern, Transport,
- Gruppe 4: Spanende Bearbeitung (z. B. Sägen, Schleifen ...),
- Gruppe 5: Umformen (z. B. Walzen, Pressen ...),
- Gruppe 6: Sonstige (alle anderen Tätigkeiten).

Für alle sechs Tätigkeitsgruppen, mit Ausnahme der Oberflächenbearbeitung, konnte durch die Gruppenbildung eine Verbesserung des Modells erzielt werden (Tabelle 2, Gruppen 1 bis 6). Hingegen liefert eine zusätzliche Unterteilung in systematische, unabhängige Untergruppen nach DIN 8580 keine weitere Verbesserung des Modells und wurde daher nicht vorgenommen. Zur Bildung einer Untergruppe aus spanender Bearbeitung mit hohem Energieeintrag in das Material wurden die Tätigkeiten Fräsen, Schleifen und Drehen ausgewählt. Es war jedoch nicht möglich, eine Gruppe zu bilden, da sich die Mediane der Verhältnisse c_A/c_E zwischen den Gruppen bzw. c_A/c_E zwischen Fräsen und Schleifen signifikant unterscheiden ($p < 0,001$).

Das höchste Bestimmtheitsmaß ($adj.R^2 = 0,668$) und der höchste Korrelationskoeffizient ($R = 0,818$) werden in der Gruppe Heißverarbeitung erreicht. Die Regressionskoeffizienten dieser Gruppe, $k = 0,729$ und $c_0 = -0,751$, unterscheiden sich zudem stark von denen anderer Gruppen und zeigen ebenso eine höhere Standardabweichung. Die Variation in den Werten für S_{Fit} weisen hauptsächlich auf die Abhängigkeit von der Anzahl der Messwertpaare hin. Für alle Tätigkeitsgruppen sind Umrechnungsfunktionen zur Berechnung von c_A angegeben (Tabelle 2).

3.3 Material

Wie zuvor für die Tätigkeiten wurde der Gesamtdatensatz in unabhängige Gruppen unterteilt, in diesem Fall nach dem Material. Zunächst wurden zwölf Materialgruppen gebildet, die über einen unterschiedlichen großen Umfang verfügen. Diese Gruppen wurden zu drei größeren Gruppen zusammengeführt. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Untergruppen innerhalb der Schlussgruppen nicht

signifikant voneinander, während sich die drei Schlussgruppen hochsignifikant voneinander unterscheiden ($p < 0,001$). Damit ergeben sich folgende Gruppen:

- Gruppe A: mineralstaubdominiert/Sonstige
 1. Mineralisches Material/Glas/Gips/Zement/Kohlenstoff/Grafit ($n = 7\,576$),
 2. Synthetisches Material/Gummi/Epoxidharz/Pulverbeschichtung ($n = 799$),
 3. Sonstige ($n = 940$)
- Gruppe B: metallstaubdominiert
 1. Metall/Metallerze/Schlacke/metallische Strahlmittel ($n = 5\,069$)
 2. Lacke/Farbe ($n = 108$)
 3. Elektroschrott ($n = 92$)
- Gruppe C: faserstaubdominiert
 1. Mineralfasern/Keramikfasern ($n = 197$)
 2. Textil ($n = 101$)
 3. Papier ($n = 126$)
 4. Asphalt/Bitumen ($n = 112$)

Die Untergruppe Lacke/Farbe enthält hauptsächlich Vorgänge, bei denen metallische Oberflächen in Verbindung mit Lacken oder Farbe poliert oder geschliffen werden. Elektroschrott umfasst hauptsächlich metallische Komponenten. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, diese Untergruppen zur Schlussgruppe B zuzuordnen. Die Untergruppe Asphalt/Bitumen wurde der Gruppe C zugeordnet, da hauptsächlich Vorgänge beschrieben werden, bei denen Fasermaterialien mit Asphalt oder Bitumen beschichtet werden.

Die Regressionskoeffizienten der Gruppen A bis C stimmen ungefähr mit denen des Gesamtdatensatzes überein (Tabelle 2, Gruppen 0 und A bis C). Die metallstaub- und die faserstaubdominierte Gruppe weisen einen identischen Koeffizienten k auf ($k = 0,614$). Nur die mineralstaubdominierte Gruppe (A) weist ein besseres Gütemaß als der Gesamtdatensatz auf ($R = 0,785$, $adj.R^2 = 0,616$). Der Standardfehler der Gruppen A und B für k und c_0 liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den Tätigkeitsgruppen. Der größere Standardfehler der Gruppe C wird durch die geringere Anzahl von Messpaaren n verursacht. S_{Fit} weist dieselbe Abhängigkeit von n auf wie die Gruppen 1 bis 6.

Im nächsten Schritt wurden Tätigkeits- und Materialgruppen verknüpft. Das heißt, die sechs Tätigkeitsgruppen wurden nach den drei Materialgruppen unterteilt. Von den 18 gebildeten Gruppen zeigen nur neun ein verbessertes $adj.R^2$. Von diesen neun Gruppen ist die Verbesserung des Parameters bei drei Gruppen $< 0,01$ und bei zwei Gruppen ist die Gruppengröße < 50 mit Werten aus stark verschiedenen Arbeitsbereichen. Daher wurden nur die folgenden vier Gruppen näher betrachtet:

- Oberflächenbearbeitung – mineralstaubdominiert (1-A),
- Heißverarbeitung – metallstaubdominiert (2-B),
- Spanende Bearbeitung – mineralstaubdominiert (4-A),
- Sonstige – metallstaubdominiert (6-B).

Die Zunahme des Standardfehlers in den Kombinationsgruppen im Vergleich zu den Gruppen A bis C oder 1 bis 6 kann durch die geringere Anzahl von Messpaaren in den einzelnen Gruppen erklärt werden (Tabelle 2, Kombinationsgruppen). Die Regressionskoeffizienten der Gruppe 1-A ähneln denen in Gruppe 1 und $adj.R^2$ ist kleiner als für den Gesamtdatensatz. Die Gruppe 6-B zeigt eine Verbesserung von $adj.R^2$ um lediglich 0,018 im Vergleich zu Gruppe 6.

Außerdem enthält die Gruppe nur 331 Datenpaare aus sehr unterschiedlichen Prozessen.

Die Gruppen 2-B und 4-A enthalten beide mehr als 2 000 Datenpaare. Obwohl sie 57 bzw. 76 % der Werte der Tätigkeitsgruppe umfassen, unterscheiden sich ihre Regressionskoeffizienten von denen der Gruppen 2 und 4. Dies lässt darauf schließen, dass durch die Kombination der beiden Variablen tatsächlich eine verbesserte Beschreibung der Daten möglich ist. Das beste Ergebnis der systematischen Auswertung ist Gruppe 2-B, die das höchste korrigierte Bestimmtheitsmaß im Vergleich zu allen anderen systematischen Gruppen und dem Gesamtdatensatz aufweist: $adj. R^2 = 0,706$.

3.4 Heuristische Gruppen

Ungeachtet der systematisch gebildeten Gruppen ist es möglich, kleinere heuristische Gruppen mit verbesserter Korrelation zusammenzustellen.

Die meisten der heuristischen Gruppen sind Untergruppen der Kombinationsgruppe 2-B und umfassen sehr spezifische Arbeitsbereiche aus Heißverarbeitung mit Metall (Tabelle 2, Gruppen α , β , δ , ϵ und ν). Die zwei Gruppen Sägen und Meißeln, Bossieren, Stemmen stammen aus der Kombinationsgruppe 4-A. Strahlen (Gruppe φ) ist eine Untergruppe von Gruppe 1, Schleifen (Gruppe ζ) ist eine Untergruppe von spanender Bearbeitung und jeweils eine heuristische Gruppe stammt aus den Kombinationsgruppen 3-A (Gruppe ω) und 5-B (Gruppe η). Mit Ausnahme der Gruppe Schweißen (Gruppe δ) ist die Anzahl der Messwertpaare sehr viel geringer als in den anderen Schlussgruppen aus Tätigkeit und/oder Material. Die jeweils in der heuristischen Gruppe inbegriffenen Arbeitsbereiche sind in **Tabelle 3** aufgeführt. Umrechnungsfunktionen, die für die Gruppen η bis w angegeben sind, gelten nur für die jeweils aufgelisteten Arbeitsbereiche.

Mit den Regressionsmodellen in Tabelle 2 für die heuristischen Gruppen ist eine genauere Beschreibung des Datensatzes möglich. Für $adj. R^2$ können Werte zwischen 0,733 und 0,869 bzw. für R zwischen 0,859 und 0,933 ermittelt werden.

Bild 3 zeigt die Funktionen für Gl. (3) mit den Regressionskoeffizienten der heuristischen Gruppen α bis ω . Die Funktionen unterscheiden sich stark voneinander. So zeigen die Gruppen Gießen und Löten einen nahezu linearen Zusammenhang ($k \approx 1$). Das heißt, in diesen Gruppen könnte näherungsweise eine lineare Funktion zur Berechnung von c_A verwendet werden. So würde die lineare Funktion der heuristischen Gruppe Löten lauten:

$$c_A = c_E * 0,572 \quad (6)$$

Die heuristische Gruppe Drahtziehen zeigt bei ähnlichen Korrelationskoeffizienten wie Löten oder Gießen einen sehr viel geringeren Koeffizienten $k = 0,695$. Die Gruppen τ und ν haben den gleichen Koeffizienten $k = 0,695$, aber unterschiedliche Koeffizienten c_0 ($\Delta c_0 = 0,236$) und zeigen aus diesem Grund auch ein anderen Kurvenverlauf (Bild 3). Durch diese Darstellung wird deutlich, dass Tätigkeit und Material einen großen Einfluss auf die zu berechnende Konzentration haben. So kann die errechnete Konzentration in jeder Gruppe andere Werte annehmen, beispielsweise $c_A \approx 1,5 \text{ mg/m}^3$ bei ζ (Meißeln, Stemmen, Bossieren) oder $c_A \approx 5,0 \text{ mg/m}^3$ bei α (Löten) für $c_E \approx 10 \text{ mg/m}^3$.

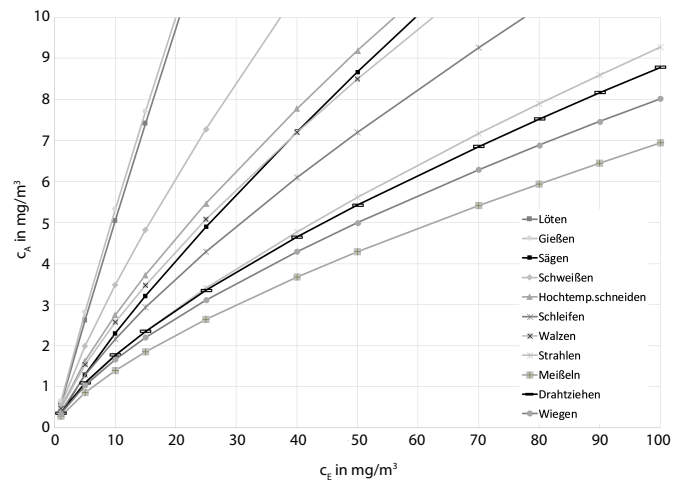


Bild 3. Vergleich der bestimmten Umrechnungsfunktionen für die heuristischen Gruppen ohne Anzeige der realen Messwerte.

4 Diskussion

4.1 Anwendung von Gl. (2)

Die „Worst-case“-Annahme mit $c_A = c_E$ bzw. $c_0 = 0$ und $k = 1$ ist in dieser Studie nicht aufgetreten. Alle c_0 -Werte sind negativ ($-0,430 \leq c_0 \leq -1,264$) und alle Werte in dieser Studie < 1 ($0,454 \leq k \leq 0,946$). Dies ist dadurch bedingt, dass $c_A \leq c_E$ gilt.

Es lässt auf einen systematischen Effekt schließen, dass alle k -Werte in dieser Studie < 1 sind, obwohl die Regressionsanalyse generell auch Werte > 1 zulässt. Daraus folgt außerdem, dass die Umrechnungsfunktionen nicht linear sind und das Verhältnis c_A/c_E bei steigender Konzentrationshöhe des E-Staubes kleiner wird.

Einzig in der heuristischen Gruppe Löten liegt der Wert 1 im Konfidenzintervall von k . Damit wäre eine lineare Umrechnungsform von E- in A-Staub möglich (Gl. (6)). Da diese Gruppe jedoch eine Untergruppe der Kombinationsgruppe 2-B ist und diese $k < 1$ zeigt, wird nicht empfohlen, die lineare Funktion für Löten anzuwenden. Es wäre möglich, die Beobachtungen in dieser heuristischen Gruppe durch weitere experimentelle Nachweise zu unterstützen, um so eine bessere Grundlage für den Nachweis eines linearen Zusammenhangs der A- und E-Staub-Konzentration zu schaffen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass diese Studie die Berechnung des Zusammenhangs von c_A und c_E nach Gl. (2) mit $k \leq 1$ und $c_0 < 0$ unterstützt.

Dies könnte Auswirkungen auf weitere Studien im Bereich der Staubgenerierung haben, da in einigen Studien von einem linearen Zusammenhang beider Staubfraktionen ausgegangen wird [16; 32]. Andererseits ergibt sich unter der Annahme von Gl. (2) die Möglichkeit, Agglomerations-effekte bei hohen Konzentrationen zu beschreiben [33; 34]. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass an einem Arbeitsplatz die Stäube unterschiedlicher Prozesse gleichzeitig gemessen und anschließend unter einer Kodierung in der Datenbank hinterlegt wurden (z. B. Schleif- und Schweißprozesse).

4.2 Gruppenzuordnung

Werden die Daten nach Gl. (2) beschrieben, erkennt man, dass die E-Staub-Konzentration die wichtigste Variable für die Bestimmung der A-Staub-Konzentration ist. Der syste-

matische Einschluss der Variablen Tätigkeiten und Material führt zu einer weiteren Verbesserung in der Beschreibung der Daten bis hin zur Kombinationsgruppe 2-B (Heißverarbeitung mit metallstaubdominiertem Material, $adj. R^2 = 0,706$; $k = 0,759$; $c_0 = -0,687$).

In den meisten anderen Kombinationsgruppen werden zu viele verschiedene Prozesse kombiniert. Aus diesem Grund treten Koeffizienten auf, die denen des Gesamtdatensatzes ähneln. Die Tabellen 2 und 3 zeigen, dass es wichtig ist, die Kombinationsgruppen weiter zu untergliedern, auch wenn das bedeutet, dass ein systematisches Vorgehen nicht möglich ist. Die heuristischen Gruppen α , β , δ , ϵ und ν , die Untergruppen von 2-B sind, zeigen eine Vielfalt an unterschiedlichen Regressionskoeffizienten und damit unterschiedlichen Umrechnungsfunktionen.

Um eine systematische Gruppenbildung über die Kombinationsgruppen hinaus zu ermöglichen, wären weitere Angaben zum Staubgenerierungsprozess wünschenswert, die zur Messung in der Datenbank hinterlegt werden müssten. So wären detailliertere Informationen über die verwendeten Werkzeuge oder Bearbeitungsmethoden, z. B. Körnung des Schleifpapiers, Angaben zu verwendeten Maschinen (z. B. die Schleifmaschinenart) oder Sägeblättern, hilfreich. Auch der Einsatz von Kühlschmierstoffen bei spanender Bearbeitung wäre eine nützliche Information, da diese Stoffe die Reibung und damit die Partikelzahl beim Bearbeitungsprozess vermindern [35].

4.3 Anwendung der Ergebnisse

Die Umrechnungsfunktionen in Tabelle 2 können für toxikologische und epidemiologische Analysen nach genauer Überprüfung des Geltungsbereichs angewendet werden.

Soll für eine bestimmte Gruppe $\ln(c_A)$ mittels der Regressionskoeffizienten in Tabelle 2 aus $\ln(c_E)$ berechnet werden, muss für das Ergebnis ein Konfidenzintervall $\pm 1,96 * s_{\text{Fit}}(\ln(c_A))$ mit angegeben werden. Diese Varianz muss zusätzlich zu den weiteren Unsicherheitsquellen, beispielsweise der Messunsicherheit und der Messunsicherheit der analytischen Verfahren, berücksichtigt werden. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die Werte der unteren Intervallgrenze von $s_{\text{Fit}}(\ln(c_A))$ nur um den Mittelwert von $\ln(c_E)$ gültig sind.

Die Güte der Regression wird über den Korrelationskoeffizienten wiedergegeben, der mit zunehmender Qualität der Beschreibung größer wird. Die beste Beschreibung ist für die heuristischen Gruppen gegeben. Für diese Gruppen werden mithilfe der Regression 73 bis 85 % der Varianz in den Daten erklärt. Diese Gruppen bilden gleichzeitig das wesentliche Ergebnis dieser Studie. Es wäre wünschenswert, durch weitere Feldversuche und experimentelle Messungen im Bereich dieser Gruppen eine Bestätigung der Regressionskoeffizienten zu erzielen.

Zur Abschätzung der A-Fraktion wird empfohlen, die Umrechnungsfunktionen der heuristischen Gruppen oder der Kombinationsgruppen zu nutzen (Tabelle 2). Falls eine Untersuchung mithilfe der vorgeschlagenen Gruppen nicht möglich ist, wird empfohlen, die Umrechnungsfunktionen der Tätigkeitsgruppen (Gruppen 1 bis 6) oder der Materialgruppen (Gruppen A bis C) unter Berücksichtigung der größeren Unsicherheit dieser Gruppen anzuwenden. Falls so wenig Informationen vorliegen, dass eine Zuordnung zu einer Gruppe weder über die Tätigkeit noch über das Mate-

rial möglich ist, wird von der Anwendung der Umrechnungsfunktion des Gesamtdatensatzes abgeraten.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Es ist möglich, auf der Basis von 15 120 Datenpaaren aus der IFA-Expositionsdatenbank MEGA Umrechnungsfunktionen zur Berechnung der alveolengängigen Staubfraktion aus der einatembaren Staubfraktion zu entwickeln. Die große Datenmenge, die vielen Tätigkeitsbereiche sowie die unterschiedlichen Materialien bilden gute Rahmenbedingungen, um die Epidemiologie, die Toxikologie, den Arbeitsschutz und die Messtechnik zu unterstützen sowie die Berechnung der A-Staub-Konzentration zu ermöglichen, wenn ausschließlich Messungen zur E-Fraktion und genügend Informationen über die Arbeitsbedingungen und das Material vorliegen. Die Umrechnungsfunktionen können auch für retrospektive Auswertungen genutzt werden, die beispielsweise durchgeführt werden, um im Anerkennungsverfahren für Fälle von Berufskrankheiten die Expositionshöhe zu bewerten.

Die Umrechnungsfunktionen dieser Studie werden mit der Gl. (2) beschrieben, wobei $k \leq 1$ und $c_0 < 0$ gefunden wurden. Gl. (2) führt nur dann zu sinnvollen Ergebnissen, wenn spezifische Tätigkeiten und Material ausgewählt werden. Liegen die in Tabelle 3 genannten Arbeitsverfahren vor, ist es möglich, die Gruppen α bis ω zu identifizieren, in denen 73 bis 87 % der Datenvarianz über die Regressionsfunktionen aus Tabelle 2 beschrieben werden können.

Zur Datenanalyse in anderen Studien wird empfohlen, die Umrechnungsfunktionen der heuristischen Gruppen oder der Kombinationsgruppen anzuwenden. Passen die betrachteten Daten zu keiner dieser Gruppen, sollten die Funktionen für die Tätigkeitsgruppen (1 bis 6) oder Materialien (A bis C) verwendet werden.

Literatur

- [1] DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel (9/1993). Berlin: Beuth 1993.
- [2] DIN ISO 7708: Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme (1/1996). Berlin: Beuth 1996.
- [3] Hazard prevention and control in the work environment: Airborne dust. Hrsg.: World Health Organization (WHO), Genf, Schweiz 1999.
- [4] DIN EN 13205-2: Exposition am Arbeitsplatz – Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sammlern für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikel – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (9/2014). Berlin: Beuth 2014.
- [5] Baur, X.: Berufskrankheiten der 4er-Gruppe der BKV-Anlage (Atemwege/Luft). In: Baur, X. (Hrsg.): Arbeitsmedizin. Heidelberg: Springer 2013, S. 123-135.
- [6] Verma, D. K.: Inhalable, total and respirable dust: a field study. Ann. Occup. Hyg. 28 (1984) Nr. 2, S. 163-172.
- [7] Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen 1973. Arbeitsschutz (1973) Nr. 9, S. 366.
- [8] Tsai, P.-J.; Vincent, J. H.; Wahl, G.; Maldonado, G.: Occupational exposure to inhalable and total aerosol in the primary nickel production industry. J. Occup. Environ. Med. 52 (1995) Nr. 12, S. 793-799.

- [9] Tsai, P.-J.; Werner, M. A.; Vincent, J. H.; Maldonado, G.: Worker exposure to nickel-containing aerosol in two electroplating shops: Comparison between inhalable and total aerosol. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 11 (1996) Nr. 5, S. 484-492.
- [10] Vincent, P. S.; Thomassen, Y.; Hetland, S.: A method for establishing tentative occupational exposure limits for inhalable dust. *Ann. Occup. Hyg.* 39 (1995) Nr. 6, S. 484-492.
- [11] Werner, M. A.; Spear, T. M.; Vincent, J. H.: Investigation into the impact of introducing workplace aerosol standards based on the inhalable fraction. *Analyst* 121 (1996) Nr. 9, S. 1207-1214.
- [12] Lilienberg, L.; Brisman, J.: Flour dust in bakeries – a comparison between methods. *Ann. Occup. Hyg.* 38 (1994) Nr. 1, S. 571-575.
- [13] Linnainmaa, M.; Laitinen, J.; Leskinen, A.; Sippula, O.; Kalliokoski, P.: Laboratory and field testing of sampling methods for inhalable and respirable dust. *J. Occup. Environ. Hyg.* 5 (2008) Nr. 1, S. 28-35.
- [14] Martin, J. R.; Zalk, D. M.: Comparison of total dust/inhalable dust sampling methods for evaluation of airborne wood dust. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 13 (1998) Nr. 3, S. 177-182.
- [15] Dahmann, D.; Bauer, H. D.; Stoyke, G.: Retrospective exposure assessment for respirable and inhalable dust, crystalline silica and arsenic in the former German uranium mines of SAG/SDAG. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 81 (2008) Nr. 8, S. 949-958.
- [16] Notø, H. P.; Nordby, K. C.; Eduard, W.: Relationships between personal measurements of 'total' dust, respirable, thoracic and inhalable aerosol fractions in the cement production industry. *Ann. Occup. Hyg.* 60 (2016) Nr. 4, S. 453-466.
- [17] Lehnert, M.; Pesch, B.; Lotz, A.; Pelzer, J.; Kendzia, B.; Gawrych, K. et al.: Exposure to inhalable, respirable and ultra-fine particles in welding fume. *Ann. Occup. Hyg.* 56 (2012) Nr. 5, S. 557-567.
- [18] Korczynski, R. E.: Dust exposures and ventilation control in the crematorium. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 12 (1997) Nr. 2, S. 122-125.
- [19] Gabriel, S.; Van Gelder, R.; Stamm, R.; Koppisch, D.; Arnone, M.; Koch, U.: Drei Millionen Datensätze in der Expositionsdatenbank MEGA. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 76 (2017) 11/12, S. 422-424.
- [20] DIN EN 689: Exposition am Arbeitsplatz – Messung der Exposition durch Einatmung chemischer Arbeitsstoffe – Strategie zur Überprüfung der Einhaltung von Arbeitsplatzgrenzwerten (4/1995). Berlin: Beuth 1995.
- [21] Riediger, G.: Geräte zur Probenahme der einatmbaren Staubfraktion (E-Staub) (Kennzahl 3010). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, 21. Lfg. X/98. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/3010
- [22] Siekmann, H.: Geräte zur Probenahme der alveolengängigen Staubfraktion (A-Staub) (Kennzahl 3020). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, 21. Lfg. X/98. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappe digital.de/3020
- [23] DIN EN 13205-2 Teil 1-6: Exposition am Arbeitsplatz – Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sammlern für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikel (9/2014). Berlin: Beuth 2014.
- [24] DIN EN 1540: Exposition am Arbeitsplatz – Terminologie (3/2012). Berlin: Beuth 2012.
- [25] Janssen, J.; Laatz, W.: Statistische Datenanalyse mit SPSS: Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Test. Berlin: Springer Gabler 2017.
- [26] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin: Springer 1999.
- [27] Andersson, L.; Bryngelsson, I. L.; Ohlson, C. G.; Nayström, P.; Lilja, B. G.; Westberg, H.: Quartz and dust exposure in Swedish iron foundries. *J. Occup. Environ. Hyg.* 6 (2009) Nr. 1, S. 9-18.
- [28] Burstyn, I.; Teschke, K.; Kennedy, S. M.: Exposure levels and determinations of inhalable dust exposure in bakeries. *Ann. Occup. Hyg.* 41 (1997) Nr. 6, S. 609-624.
- [29] Weggeberg, H.; Foreland, S.; Buhagen, M.; Hilt, B.; Flaten, T. P.: Multi-element analysis of airborne particulate matter from different work tasks during subsea tunnel rehabilitation work. *J. Occup. Environ. Hyg.* 13 (2016) Nr. 10, S. 725-740.
- [30] Draper, N. R.; Smith, H.: Applied regression analysis. New York, USA: Wiley & Sons 1998.
- [31] DIN 8580: Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung (3/2003). Berlin: Beuth 2003.
- [32] Verma, D. K.: Inhalable, total and respirable dust: A field study. *Ann. Occup. Hyg.* 28 (1984) Nr. 2, S. 163-172.
- [33] Barbosa-Cánovas, G. V.; Ortega-Rivas, E.; Juliano P.; Yan, H.: Food powders: Physical properties, processing, and functionality. New York, USA: Kluwer Academic/Plenum Publishers 2005.
- [34] Goudeli, E.; Eggersdorfer, M. L.; Pratsinis, S. E.: Coagulation-agglomeration of fractal-like particles: Structure and self-preserving size distribution. *Langmuir* 31 (2015) Nr. 4, S. 1320-1327.
- [35] Vaarslahti, K.; Keskinen, J.; Giechaskiel, B.; Solla, A.; Murtonen, T.; Vesala, H.: Effect of lubricant on the formation of heavy-duty diesel exhaust nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.* 39 (2005) Nr. 21, S. 8497-8504.