

DGUV Report 1/2020

**Zum Verhältnis von einatembaren und
alveolengängigen Staubfraktionen
und deren Inhaltsstoffe in
verschiedenen Arbeitsbereichen**

Verfasser: Cornelia Wippich
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),
Sankt Augustin

Herausgeber: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV)
Glinkastr. 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0
Telefax: 030 13001-9876
Internet: www.dguv.de
E-Mail: info@dguv.de

– Juli 2020 –

Publikationsdatenbank: www.dguv.de/publikationen

ISBN (Print): 978-3-948657-09-3
ISBN (Online) 978-3-948657-10-9



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

**Zum Verhältnis von einatembaren und alveolengängigen
Staubfraktionen und deren Inhaltsstoffe
in verschiedenen Arbeitsbereichen**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

Doktor der Sicherheitswissenschaften, Dr. rer. sec

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Cornelia Wippich
aus Augsburg

Wuppertal 2020

Danksagung

Mein größter Dank gilt Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. *Eberhard Schmidt*, meinem Doktorvater, der mich herzlich im Institut für Partikeltechnologie aufgenommen und mein Interesse an der Partikelforschung geweckt hat. Ich danke ihm insbesondere für die fachliche und menschliche Unterstützung in den Jahren der Dissertation, seine neuen Denkanstöße und seine fachlichen Ideen zu meiner Arbeit.

Darüberhinaus möchte ich Prof. Dr.-Ing. *Udo Eickmann* für die Übernahme des Gutachtens dieser Arbeit danken, sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. *Anke Kahl*, die als Vorsitzende der Prüfungskommission meine mündliche Prüfung gerade noch vor der Corona-Pandemie zugelassen hat, wofür ich ihr sehr dankbar bin. Zudem möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. pol. *Ralf Pieper* für die Übernahme des Beisitzes in der Prüfungskommission danken.

Viele Personen haben mich auf meinem Weg während der Promotion begleitet und unterstützt. In erster Linie möchte ich Prof. Dr. rer. nat. *Dietmar Breuer* für seinen Glauben an meine Arbeit, tatkräftige Unterstützung und Freude an dem Projekt danken, die er auch auf mich übertragen hat. Außerdem hat er mir alle „Stolpersteine“, die während des Projekts aufgetaucht sind, aus dem Weg geräumt und mir damit vieles ermöglicht und erleichtert.

Im Speziellen möchte ich meinem Mentor Dr. rer. nat. *Jörg Rissler* danken, der mir wichtige mathematische und statistische Zusammenhänge näher gebracht und mich auch emotional während dieser Zeit unterstützt hat. Ein großer Dank gebührt ebenso Dr. rer. nat. *Dorothea Koppisch* für ihre fachliche Expertise im Umgang mit der MEGA-Datenbank des IFA und dafür, dass sie sich immer für mich Zeit genommen hat und für ihr offenes Ohr in der ganzen Zeit.

Ich danke meinen Freunden und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IFA, von denen ich viele ebenfalls zu meinen Freunden zähle, die mich in den letzten Jahren fachlich und seelisch unterstützt haben, mir bei Rückschlägen zur Seite gestanden und neue Wege aufgezeigt haben.

Den Mitarbeitern des Instituts für Partikeltechnologie möchte ich für ihre herzliche Art danken, mit der sie mich aufgenommen und mir geholfen haben, mich zurecht zu finden.

Meinem Partner *Tim Hausen*, meinen Eltern und meinen Geschwistern danke ich von ganzem Herzen für ihre Unterstützung von Anfang an und ihren unerschütterlichen Glauben an mich. Insbesondere möchte ich meinem Bruder *Simon Wippich* danken, der mich an den entscheidenden Punkten bei meinen beruflichen Entscheidungen beraten hat. Ohne meine Familie wäre ich nicht an dem Punkt angekommen, an dem ich heute stehe.

Kurzfassung

Zum Verhältnis von einatembaren und alveolengängigen Staubfraktionen und deren Inhaltsstoffe in verschiedenen Arbeitsbereichen

Im Arbeitsschutzsektor haben sich bislang nur wenige Studien mit der Umrechnung von einatembarem in alveolengängigen Staub befasst. Diese ist jedoch von größter Wichtigkeit, wenn retrospektive Auswertungen zu Expositionshöhen oder Beurteilungen von Berufskrankheiten durchgeführt werden sollen. Daher wird in dieser Arbeit die Möglichkeit einer Umrechnung von einatembarem in alveolengängigen Staub gegeben.

Dazu werden aus einem Datensatz, der 15 120 Parallelmessungen aus alveolengängigem und einatembarem Staub (A- bzw. E-Staub) von verschiedenen Arbeitsbereichen enthält und unterschiedliche Materialien umfasst, mithilfe einer linearen Regressionsanalyse Umrechnungsfunktionen aus E- in A-Staub entwickelt. Dazu wird der Gesamtdatensatz nach den Einflussgrößen *Tätigkeit* und *Material* unterteilt. Dabei zeigt sich, dass die Konzentration des E-Staubes (c_e) zur Beschreibung des A-Staubes (c_a) die wichtigste Prädiktorvariable ist ($adj.R^2 = 0,585$). Eine Verbesserung des Modells wird durch die Unterteilung des Gesamtdatensatzes in sechs Tätigkeits- und drei Materialfinalgruppen erreicht (z. B. *Heißverarbeitung* $adj.R^2 = 0,668$). Das Bilden von Kombinationsgruppen aus *Tätigkeit* und *Material* führt zu einer weiteren Verbesserung des Modells. Die beste Beschreibung wird in der Gruppe 2-B: *Heißverarbeitung-Metallstaub-dominiert* erreicht, die von den Finalgruppen die höchsten Werte für Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß zeigt ($adj.R^2 = 0,706$, $R = 0,840$). Zusätzlich zur systematischen

Herangehensweise werden aufgrund inhaltlicher und statistischer Überlegungen sogenannte heuristische Gruppen mit $adj.R^2$ zwischen 0,869 und 0,733 gebildet.

Alle Umrechnungsfunktionen sind Potenzfunktionen mit Exponenten zwischen 0,500 und 0,946. Die Annahmen, dass ein einfacher Faktor zur Umrechnung der Staubfraktionen ausreichend ist und generell eine lineare Korrelation zwischen A- und E-Staub besteht, werden durch diese Arbeit nicht unterstützt.

Das Gesundheitsrisiko inhalierter Stäube wird durch metallische Inhaltsstoffe zusätzlich erhöht, wenn diese beispielsweise kanzerogen sind oder allergische Reaktionen im Körper hervorrufen können. Für die metallischen Inhaltsstoffe Mangan, Nickel und Kobalt in A- und E-Staub werden nach demselben, oben genannten Verfahren Umrechnungsfunktionen zur Berechnung des Anteils der Substanz in der jeweiligen Staubfraktion entwickelt und nach den Tätigkeitsgruppen unterteilt. Diese Gruppen bzw. Funktionen sind zwar nicht repräsentativ für den jeweiligen Datensatz, sie eignen sich jedoch als Basis für weitere Studien.

Darüber hinaus wird gezeigt, dass die Konzentrationsverhältnisse von A- und E-Staub, wie sie durch die Umrechnungsfunktionen vorhergesagt werden können, mit Partikelgrößenverteilungen für die gesamten Schwebstoffe in der Luft, die in DIN EN 13205-2 angegeben werden, erklärbar sind.

Abstract

Discussion of the ratio between inhalable and respirable dust fractions and their constituents in a range of working areas

In the field of occupational safety and health only a very limited number of studies are concerned with the conversion of inhalable to respirable dust. This conversion gains more importance when retrospective evaluations on the level of exposure should be performed or occupational diseases should be evaluated. Because of this reasons, this study provides the possibility to convert inhalable to respirable dust. For this purpose, a dataset of 15.120 parallel measurements of respirable and inhalable dust, measured in different industrial sectors and including various materials, is used to develop conversion functions from inhalable to respirable dust using linear regression analysis.

On this purpose, the whole dataset is divided into the variables *working activity* and *material*. It is shown, that the most important predictor variable is inhalable dust ($adj.R^2 = 0.585$). Further improvement of the regression model is achieved when the whole dataset is divided into six *working activity* and three material groups (for example *high temperature processing*, $adj.R^2 = 0.668$). The formation of combination groups from *working activity* and *material* leads to further improvement of the model. The best description of the data is given in group 2-B: *High temperature processing metal dust-dominated*. This group shows the best correlation coefficient ($R = 0.840$) and adjusted coefficient of determination ($adj.R^2 = 0.706$).

In addition to the systematic procedure, some heuristic groups with $adj.R^2$ between 0.869 and 0.733 are formed due to considerations of content and statistics. All conversion functions are power functions with exponents between 0.500 and 0.946. The assumptions, that one single factor for the conversion of the inhalable and respirable dust fraction are sufficient and that these two dust fractions are generally linear correlated, is not supported in this study.

The health risk caused by inhaling occupational dust is further increased when the dust contains metallic constituents, which are carcinogenic, toxic or might cause allergic reactions for example. Following the same procedure as it was performed on the dust fractions, conversion functions for the metal constituents manganese, nickel and cobalt are developed for the calculation of the amount of each constituent in the respective dust fraction. These groups were also divided into working activity groups. All of these groups and functions are not representative for the respective dataset, but they can build a basis for further studies.

In addition it is shown, that the ratios, which are determined by the inhalable and respirable dust concentrations and predicted by the conversion functions, can be explained by particle size distributions for all air suspended particles which are described in DIN EN 13205-2.

Résumé

Le rapport entre les fractions de poussière inhalables et alvéolaires et leurs constituants dans différents domaines d'activité

Dans le domaine de la sécurité et de la santé au travail, seules quelques études ont été à ce jour consacrées à la manière de convertir la poussière inhalable en poussière alvéolaire. Or, cela est extrêmement important lorsqu'il s'agit de procéder rétrospectivement à l'estimation de niveaux d'exposition, ou d'évaluer des maladies professionnelles. C'est pourquoi la présente étude offre la possibilité de convertir la poussière inhalable en poussière alvéolaire.

À cet effet, des fonctions permettant de convertir la poussière inhalable en poussière alvéolaire ont été élaborées à l'aide d'une analyse de régression linéaire à partir d'un ensemble de données comprenant 15 120 mesures parallèles de poussière alvéolaire et de poussière inhalable provenant de différents secteurs d'activité et incluant divers matériaux. Pour cela, l'ensemble de données a été divisé selon les facteurs d'influence *activité* et *matériau*. Il s'est avéré que la concentration de la poussière inhalable (c_i) était la valeur prédictive la plus importante pour la description de la poussière alvéolaire (c_a) ($adj.R^2 = 0,585$). Le modèle peut être affiné en divisant l'ensemble de données en six groupes finaux d'activité et trois de matériau (par exemple le *traitement à haute température* $adj.R^2 = 0,668$). La formation de groupes combinant *activité* et *matériau* permet d'affiner encore le modèle.

La meilleure description est obtenue dans le groupe 2-B, à dominante '*traitement à chaud – poussière métallique*', qui, parmi les groupes finaux, présente les valeurs les plus élevées en termes de coefficient de corrélation et de coefficient de détermination ($adj.R^2 = 0,706$, $R = 0,840$). En plus de l'approche systématique, des groupes heuristiques d'un $adj.R^2$ se situant entre 0,869 et 0,733 sont

formés sur la base de considérations de contenu et de statistiques.

Toutes les fonctions de conversion sont des fonctions de puissance avec des exposants compris entre 0,500 et 0,946. Les hypothèses selon lesquelles un simple facteur suffit pour convertir les fractions de poussière, et selon lesquelles il existe généralement une corrélation linéaire entre la poussière alvéolaire et la poussière inhalable ne se sont pas trouvées étayées par la présente étude.

Le risque pour la santé provoqué par l'inhalation de poussières en milieu professionnel se trouve encore accru lorsque ces poussières contiennent des constituants métalliques, notamment si ceux-ci sont cancérigènes ou susceptibles de provoquer des réactions allergiques dans l'organisme. Pour les constituants métalliques que sont le manganèse, le nickel et le cobalt contenus dans la poussière alvéolaire et la poussière inhalable, des fonctions de conversion permettant de calculer la proportion de cette substance dans la fraction de poussière respective sont élaborées selon la même procédure que celle mentionnée ci-dessus, et réparties selon les groupes d'activités. Bien que ces groupes et fonctions ne soient pas représentatifs pour l'ensemble de données en question, ils peuvent néanmoins servir de base pour des études ultérieures.

En outre, il est démontré que les rapports de concentration entre poussière alvéolaire et poussière inhalable, tels qu'ils peuvent être prédits par les fonctions de conversion, peuvent s'expliquer par la distribution granulométrique de toutes les particules en suspension dans l'air décrite dans la norme EN 13205-2.

Resumen

Sobre la relación entre las fracciones de polvo inhalables y las respirables así como sus componentes en diversos ámbitos de trabajo

Hasta la fecha, son pocos los estudios en materia de seguridad laboral que tratan la conversión de polvo inhalable a polvo respirable. Y sin embargo, dicha conversión es sumamente importante cuando se realizan evaluaciones retrospectivas sobre la cantidad de exposición o se evalúan las enfermedades profesionales. Por ello, este estudio brinda la posibilidad de convertir polvo inhalable a respirable. Para ello, a partir de una serie de datos de 15.120 mediciones paralelas de polvo inhalable y respirable realizadas en diferentes sectores industriales y teniendo en cuenta materiales diversos, se desarrollan funciones de conversión de polvo inhalable a respirable con un análisis de regresión lineal. Con este motivo, la serie de datos se divide en función de las variables *actividad* y *material*. Al respecto se muestra que la concentración del polvo inhalable es la variable predictiva más importante para la descripción del polvo respirable ($adj.R^2 = 0,585$). Para mejorar el modelo, se realiza una subdivisión de toda la serie de datos en seis grupos de actividad y tres grupos de material (*por ejemplo, procesamiento en caliente* $adj.R^2 = 0,668$). El modelo mejora aún más al establecer grupos combinados de actividad y material. La mejor descripción de los datos se alcanza en el grupo 2-B: *metal en procesamiento a altas temperaturas dominado por polvo*, que de todos los grupos finales alcanza los mayores valores del coeficiente de correlación y del coeficiente de determinación ($adj.R^2 = 0,706$, $R = 0,840$). Además de proceder de manera sistemática, se forman los denominados grupos heurísticos en función de reflexiones de contenido y estadísticas con un $adj.R^2$ entre 0,869 y 0,733.

Todas las funciones de conversión son funciones de potencia con exponentes entre 0,500 y 0,946. Las suposiciones de que baste un simple factor para convertir las fracciones de polvo y que exista en general una correlación lineal entre el polvo respirable y el polvo inhalable no se confirman en este estudio.

El riesgo para la salud a consecuencia de los polvos inhalables aumenta adicionalmente a consecuencia de los contenidos metálicos de los mismos, cuando estos son por ejemplo carcinógenos o pueden provocar relaciones alérgicas en el cuerpo. Para los contenidos metálicos de manganeso, níquel y cobalto en el polvo respirable e inhalable se desarrollan funciones de conversión según los mismos procesos antes citados para calcular la proporción de la sustancia en la fracción de polvo correspondiente y luego se subdividen en los grupos de actividad. Aunque estos grupos y funciones no sean representativos para la serie de datos en cuestión, sin embargo sí pueden tomarse como base para futuros estudios.

Además, se muestra que las proporciones determinadas por las concentraciones de polvo respirables e inhalables predichas por las funciones de conversión se explican en función de las distribuciones de tamaño de partículas respecto a todas las partículas suspendidas en el aire que se describen en DIN EN 13205-2.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	19
1.1	Ausgangssituation	19
1.2	Literaturrecherche	19
1.2.1	Umrechnung Staubfraktion	19
1.2.2	Einflussgrößen	20
1.2.3	Lineare Regression	20
1.3	Zielsetzung	21
2	Grundlagen	23
2.1	Begriffsbestimmungen	23
2.1.1	Aerodynamischer Durchmesser	23
2.1.2	Einatembare Staub	23
2.1.3	Alveolengängiger Staub	23
2.2	Berufsbedingte Krankheiten	24
2.3	Grenzwerte	24
2.4	Ablaufschema einer Messung.....	26
2.4.1	Datenerhebung	26
2.4.2	Probennahmesysteme (PS)	26
2.4.3	Analytik der Probenträger	31
2.4.4	Datenbank	32
3	Methodik	35
3.1	Datenbankauswertung zu den relevanten Staubfraktionen	35
3.1.1	Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren	35
3.1.2	Variablenselektion	36
3.1.3	Statistische Verfahren	37
3.2	Datenbankauswertung zu den metallischen Inhaltsstoffen	43
3.2.1	Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren	43
3.2.2	Statistische Verfahren	43
3.3	Partikelgrößenverteilungen der Umrechnungsfunktionen	43
3.3.1	Allgemeine Vorbemerkung	43
3.3.2	Berechnung des Konzentrationsverhältnisses aus Partikelgrößenverteilungen	44
4	Ergebnisse	47
4.1	Datenbankauswertung zu den relevanten Staubfraktionen	47
4.1.1	Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren	47
4.1.2	Gruppenbildung	50
4.2	Datenbankauswertungen zu den metallischen Inhaltsstoffen	66
4.2.1	Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren	66
4.2.2	Unterscheidung der Tätigkeitsgruppen	67
4.2.3	Lineare Regressionsanalyse	67
4.3	Partikelgrößenverteilungen der Umrechnungsfunktionen	70
4.3.1	Das Verhältnis aus A- und E-Staub für ausgewählte Partikelgrößenverteilungen	70
4.3.2	Bestimmen möglicher Partikelgrößenverteilungen in heuristischen Gruppen	72
5	Diskussion	75
5.1	Bewertung des Gesamtdatensatzes	75
5.2	Gruppenbildung	75
5.3	Anwendung der Gleichung (3.3)	76
5.4	Weitere Einflussgrößen	78
5.4.1	Probennahmesysteme	78
5.4.2	Probennahmejahr	78
5.4.3	Probennahmeart	78

5.5	Metallische Inhaltsstoffe	79
5.6	Anwendung der Ergebnisse	80
5.7	Vergleich mit der Literatur	81
5.8	Partikelgrößenverteilungen der Umrechnungsfunktionen	82
6	Schlussfolgerung und Ausblick	85
7	Anhang	87
8	Literatur	115

Tabellenverzeichnis

2.1	Zeitlicher Verlauf der Staubgrenzwerte in Deutschland	25
2.2	Derzeit gültige Grenzwerte für metallische Inhaltsstoffe in Deutschland	25
2.3	Aufstellung der relevanten Probennahmesysteme und -köpfe mit Spezifikationen und Anzahl (n) in dieser Arbeit	27
2.4	Einige der wichtigsten Pflichtfelder, die in der IFA-Expositionsdatenbank MEGA vom Messtechnischen Dienst hinterlegt werden müssen und ggf. Verwendung in der vorliegenden Arbeit; fettgedruckt: Schlüsselvariable.....	32
3.1	Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regression [86] sowie Maßnahmen zur Überprüfung...	41
4.1	Überprüfung der Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regression für alle Gruppen	41
4.2	Tätigkeitsgruppen mit Anzahl der Messwertpaare (Finalgruppen)	51
4.3	Untergruppen der Gruppe <i>Spanende Bearbeitung</i> nach DIN 8580	51
4.4	Aus dem Gesamtdatensatz gebildete Materialgruppen	53
4.5	Aufstellung der gebildeten Materialfinalgruppen	53
4.6	Regressionskoeffizienten k und C_0 mit Standardfehlern für Gleichung (3.3) und s_{Fit} für die Gruppen 0 bis 6, A bis C, Kombinationsgruppen und den heuristischen Gruppen, sowie deren Umrechnungsfunktionen und die Anzahl der Messwertpaare (n); Streudiagramme aller Gruppen im Anhang	54
4.7	Testergebnisse der verknüpften Gruppen, Varianzhomogenität der Materialgruppen innerhalb der jeweiligen Tätigkeitsgruppe, Signifikanz der Materialgruppen innerhalb der jew. Tätigkeitsgruppe; * - keine Unterschiede zwischen den Untergruppen	55
4.8	Gütemaße und Messwertanzahl der Regressionsanalyse für die Kombinationsgruppen.....	56
4.9	Heuristische Gruppen, ihre Stammgruppen, Materialien, berücksichtigte Arbeitsbereiche und n	56
4.10	Probennahmesysteme zur Messung der E-Fraktion.....	60
4.11	Probennahmesysteme zur Messung der A-Fraktion	60
4.12	Liste der am häufigsten verwendeten Probennahmesystemen für Parallelmessungen von A- und E-Staub.....	60
4.13	Kombination aus Inhaltsstoff in A- und E-Staub und der Tätigkeitsgruppe mit angegebener Messpaarzahl.....	67
4.14	Aufstellung der Regressionsparameter der Inhaltsstoffe, Anzahl (n), Korrelationskoeffizient (R), korrigiertes Bestimmtheitsmaß ($adj.R^2$), Regressionskoeffizienten C_0 und k , s_{Fit} und die Umrechnungsfunktion; Streudiagramme im Anhang	68
4.15	Minimal und maximal mögliche Konzentrationsverhältnisses in jeder heuristischen Gruppe	73
5.1	Vergleich der Regressionskoeffizienten von <i>Okamoto</i> et al. [26] und dieser Arbeit	81
7.1	Anzahl der A-Staub-Messungen je Messsystem und Tätigkeitsgruppe.....	101
7.2	Anzahl der E-Staub-Messungen je Messsystem und Tätigkeitsgruppe	102
7.3	Verwendung der E-Staub-Probennahmesysteme durch die Messtechnischen Dienste	104
7.4	Verwendung der A-Staub-Probennahmesysteme durch die Messtechnischen Dienste	109
7.5	Niedrigste und höchste E-Staub-Konzentrationsmesswerte, die in den einzelnen heuristischen Gruppen berücksichtigt worden sind	114

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anscombe-Quartett [35]	21
2.1	Gefahrstoffrelevante Staubfraktionen und deren Abscheidegrade in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser [38].....	23
2.2	Ablaufschema einer Arbeitsplatzmessung	27
2.3	A-Staub-Probennahmekopf für das VC-25; Filterdurchmesser: 150 mm [62].....	28
2.4	A-Staub-Probennahmekopf mit Impaktor für das VC-25; Filterdurchmesser: 150 mm [62].....	28
2.5	VC-25 mit E-Staub-Probennahmekopf; Filterdurchmesser: 150 mm [62]	28
2.6	Gravikon PM4 Messgerät [64]	28
2.7	A-Staub-Probennahmekopf für das Gravikon PM4 Messgerät; Filterdurchmesser: 70 mm [64].....	29
2.8	E-Staub-Probennahmekopf für das Gravikon PM4 Messgerät; Filterdurchmesser: 70 mm [64].....	29
2.9	Aufbau des FSP für einen Volumenstrom von 2 l/min; Filterdurchmesser: 37 mm [65]	29
2.10	Aufbau des FSP für einen Volumenstrom von 10 l/min; Filterdurchmesser: 37 mm [65].....	30
2.11	Aufbau des GSP; Filterdurchmesser: 37 mm [66].....	30
2.12	Aufbau des PGP-EA Systems zur gleichzeitigen Messung von A- und E-Staub; Durchmesser eingesetzter PU-Schaum: 20 mm; Filterdurchmesser: 37 mm [68].....	31
2.13	Aufbau des PGP-EA Systems zur gleichzeitigen Messung von A- und E-Staub in der Spezialausführung zur Messung am Schweißerschutzschild; Durchmesser eingesetzter PU-Schaum: 20 mm; Filterdurchmesser: 37 mm [68]	31
3.1	Flussdiagramm zur Gruppenbildung unter Berücksichtigung der Variablen.....	38
3.2	Beispiel einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, Konfidenzintervall im Bereich von $1-\alpha$, bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$; dabei $x = \text{Ereignis}$ und $f(x) = \text{Wahrscheinlichkeitsdichte}$ für das Eintreten des Ereignisses [80].....	39
3.3	Darstellung einer Beispieltrendlinie mit den Beobachtungswerten y_i , den gegebenen Werten für x_i und den Residuen (gestrichelte Linien)	40
3.4	Die Konventionen der drei Staubfraktionen in Prozent der gesamten luftgetragenen Partikeln nach DIN EN 481 [1].....	45
3.5	Schematische Darstellung der Trennfunktionen $G > E$ und $E > A$ bei lognormalverteilten Partikelgrößen.....	45
4.1	Histogramm der logarithmierten E-Staub-Konzentrationen; äquidistante Abstände, Klassenbreite: 0,2	47
4.2	Standardisiertes Residuenstreudiagramm des Gesamtdatensatzes mit erkennbaren Schnitten bei $c_A \leq c_E$ (diagonal verlaufende Hilfslinie) und $c_A \leq 10 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E \leq 100 \text{ mg/m}^3$ (senkrecht verlaufende Hilfslinie)	49
4.3	Darstellung des transformierten Gesamtdatensatzes mit linearer Trendlinie (durchgezogene Linie), 95-%-Konfidenzintervall (gepunktet) und 1 : 1 Linie (gestrichelt, schwarz)	50
4.4	Boxplot der sechs Tätigkeitsgruppen in Abhängigkeit von ihrem Konzentrationsverhältnis	51
4.5	Exemplarisches Residuenstreudiagramm für <i>Oberflächenbearbeitung</i>	52
4.6	Residuenhistogramm der Gruppe <i>Heißverarbeitung</i> , äquidistante Abstände, Klassenbreite: 0,2; mit Normalverteilungskurve.....	52
4.7	Darstellung der Funktionen nach Gl. (3.4) der heuristischen Gruppen ohne Realmesswerte.....	58
4.8	Umrechnungsfunktion von <i>Schweißen</i> ($n = 1126$) mit 95-%-Konfidenzintervall und 1 : 1 Linie (gepunktet)	58
4.9	Umrechnungsfunktion von <i>Strahlen</i> ($n = 57$) mit 95-%-Konfidenzintervall und 1 : 1 Linie (gepunktet)	59
4.10	Streudiagramm der heuristischen Gruppe <i>Drahtziehen</i> mit zwei Regressionsfunktionen: mit Hebelwert (schwarz gestrichelte Linie), ohne Hebelwert (grau gestrichelte Linie), 1 : 1 Linie (gepunktete, schwarze Linie) und markiertem Hebelwert	59
4.11	Streudiagramm der heuristischen Gruppe <i>Gießen</i> mit zwei Regressionsfunktionen: mit Hebelwert (schwarz gestrichelte Linie), ohne Hebelwert (grau gestrichelte Linie), 1 : 1 Linie (gepunktete, schwarze Linie) und markiertem Hebelwert	59
4.12	Streudiagramm der heuristischen Gruppe <i>Löten</i> mit zwei Regressionsfunktionen: mit Hebelwerten (schwarz gestrichelte Linie), ohne Hebelwerte (graugestrichelte Linie), 1 : 1 Linie (gepunktete, schwarze Linie) und markierten Hebelwerten	59
4.13	Balkendiagramm der E-Staub-PS gegen Tätigkeitsgruppen; Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Tätigkeitsgruppe siehe Anhang: Tabelle 7.2	61

4.14	Balkendiagramm der A-Staub-PS gegen Tätigkeitsgruppen; Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Tätigkeitsgruppe siehe Anhang: Tabelle 7.1	62
4.15	Wahl der Probennahmesysteme in Abhängigkeit der Messtechnischen Dienste (E-Staub); Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Messtechnischer Dienst siehe Anhang: Tabelle 7.3.	63
4.16	Wahl der Probennahmesysteme in Abhängigkeit der Messtechnischen Dienste (A-Staub); Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Messtechnischer Dienst siehe Anhang: Tabelle 7.4	64
4.17	Boxplot des Verhältnisses c_A / c_E gegen das Probennahmejahr	65
4.18	Verlauf der A- und E-Staub-Konzentrationen gegen die Probennahmejahre	66
4.19	Regressionsfunktionen der Tätigkeitsgruppen <i>Heißverarbeitung</i> und <i>Spanende Bearbeitung</i> für Mangan	69
4.20	Nickelkonzentration in A- und E-Staub für die Tätigkeitsgruppen <i>Spanende Bearbeitung</i> und <i>Heißverarbeitung</i>	69
4.21	Kobaltkonzentration in A- und E-Staub für die Tätigkeitsgruppe <i>Spanende Bearbeitung</i>	70
4.22	Exemplarische Verteilung mit $MMAD = 15 \mu m$ und $GSD = 3,00$ (graue Linie) und Trennkurven (schwarze Linien) nach DIN 481 (x-Achse in logarithmischer Skalierung)	71
4.23	Dreidimensionale Darstellung interessierender Partikelgrößenverteilungen bei lognormalverteilter Massendichte	71
4.24	Höhenliniendiagramm der interessierenden Partikelgrößenverteilungen bei lognormalverteilter Massendichte; GSD vs. $MMAD$	72
4.25	Beispielskizze zur Abhängigkeit des Verhältnisses c_A / c_E von c_E ; in dieser Skizze gilt: $k = 0,9$ und $C_0 = -0,6$	73
4.26	Höhenliniendiagramm mit grafischer Darstellung von Partikelgrößenverteilungen, die zur Umrechnungsfunktion von <i>Löten</i> (rot hinterlegter Bereich) und <i>Strahlen</i> (blau hinterlegter Bereich) passen	73
7.1	Streudiagramm Gesamtdatensatz mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 15\ 120$	87
7.2	Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: <i>Oberflächenbearbeitung</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 805$	87
7.3	Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: <i>Heißverarbeitung</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 2\ 974$	88
7.4	Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: <i>Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 3\ 473$	88
7.5	Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: <i>Spanende Bearbeitung</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 4\ 640$	89
7.6	Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: <i>Umformen</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 1\ 348$	89
7.7	Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: <i>Sonstige</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 1\ 880$	90
7.8	Streudiagramm Materialgruppe A: <i>Mineralstaub-dominiert/Sonstige</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 9\ 315$	90
7.9	Streudiagramm Materialgruppe B: <i>Metallstaub-dominiert</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 5269$	91
7.10	Streudiagramm Materialgruppe C: <i>Faser-dominiert</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 536$	91
7.11	Streudiagramm Kombinationsgruppe 1-AC: <i>Oberflächenbearbeitung/Mineralstaub/Faserstaub-dominiert</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 553$	92
7.12	Streudiagramm Kombinationsgruppe 2-B: <i>Heißverarbeitung/Metallstaub-dominiert</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 2\ 265$	92
7.13	Streudiagramm Kombinationsgruppe 4-A: <i>Spanende Bearbeitung/Mineralstaub-dominiert</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 2\ 632$	93
7.14	Streudiagramm Kombinationsgruppe 6-BC: <i>Sonstige/Metallstaub/Faserstaub-dominiert</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 548$	93
7.15	Streudiagramm <i>Löten</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 34$	94

7.16	Streudiagramm <i>Gießen (Metall)</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 77$	94
7.17	Streudiagramm <i>Schweißen</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 1126$	95
7.18	Streudiagramm <i>Sägen (mineralisch)</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 54129$	95
7.19	Streudiagramm <i>Hochtemperaturschneiden</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 176$	96
7.20	Streudiagramm <i>Schleifen (mineralisch)</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 107$	96
7.21	Streudiagramm <i>Walzen</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 35$	97
7.22	Streudiagramm <i>Strahlen</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-% Konfidenzintervall; $n = 57$	97
7.23	Streudiagramm <i>Meißeln, Bossieren, Stemmen</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 41$	98
7.24	Streudiagramm <i>Drahtziehen</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 61$	98
7.25	Streudiagramm <i>Wiegen (mineralisch)</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 98$	99
7.26	Streudiagramm <i>Kobalt</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 57$	99
7.27	Streudiagramm <i>Mangan</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 111$	100
7.28	Streudiagramm <i>Nickel</i> mit Realmesswerten und Potenz-Trendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 126$	100

Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

Abkürzungen und chemische Elementbezeichnungen

Abkürzung	Bezeichnung
A-Fraktion	Alveolengängige Fraktion
A-Staub	Alveolengängiger Staub
AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
AB	Arbeitsbereich
AES	Atomemissionsspektrometrie
AK	Akzeptanzkonzentration
BK	Berufskrankheit
ANOVA	Einfaktorielle Varianzanalyse
Co	Kobalt
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V.
E-Fraktion	Einatembare Fraktion
E-Staub	Einatembarer Staub
FSP	Feinstaubprobennahmesystem
GSD	Geometrische Standardabweichung
GSP	Gesamtstaubprobennahmesystem
H ₀	Nullhypothese
H ₁	Alternativhypothese
IBA	Individueller betrieblicher Arbeitsbereich
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
IFA	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzliche Unfallversicherung
MAG-Schweißen	Metall-Aktivgasschweißen
MEGA	Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz
MGU	Messsystem Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger
MIG-Schweißen	Metall-Inertgasschweißen
MMAD	Massebezogener medianer aerodynamischer Durchmesser
Mn	Mangan
MTD	Messtechnischer Dienst
Ni	Nickel
PA	Probennahmeart
PGP	Personengetragenes Probennahmesystem
PM _{2,5}	Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 2,5 µm
PM ₄	Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 4 µm
PM ₁₀	Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm
PS	Probennahmesystem
TK	Toleranzkonzentration
TRFA	Totalreflektierende Röntgenfluoreszenzspektrometrie
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UV-Träger	Unfallversicherungsträger
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse

Mathematische Zeichen, Symbole und Einheiten

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Signifikanzniveau/Irrtumswahrscheinlichkeit	-
$b_0; b_1$	Regressionskoeffizienten	-
c_A	A-Staub-Konzentration	mg/m ³
c_A^*	A-Staub-Konzentration	entdimensioniert
$\hat{c}_{A c_E(max)}$	A-Staub-Konzentration bei der größten E-Staub-Konzentration	mg/m ³
$\hat{c}_{A c_E(min)}$	A-Staub-Konzentration bei der kleinsten E-Staub-Konzentration	mg/m ³
c_E	E-Staub-Konzentration	mg/m ³
c_E^*	E-Staub-Konzentration	entdimensioniert
$c_{E(max)}$	Größte E-Staub-Konzentration	mg/m ³
$c_{E(min)}$	Kleinste E-Staubkonzentration	mg/m ³
C_0	Regressionskoeffizient (Achsenabschnitt)	-
C_i	Cook'sche Distanz	-
d	Durbin-Watson Prüfgröße	-
D	Durchmesser	μm
D_{ae}	Aerodynamischer Durchmesser	μm
E	Einatembare Konvention	-
e	Eulersche Zahl	-
e_i	Residualwert	-
$E_{G \rightarrow E}$	Trennfunktion von G- nach E-Staub	-
$E_{E \rightarrow A}$	Trennfunktion von E- nach A-Staub	-
erf	Fehlerfunktion	-
F_A	Wahrscheinlichkeitsfunktion	-
$f(x)$	Funktion in Abhängigkeit von x; hier: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	-
G	Gesamtheit aller Schwebstoffe in der Luft	-
GSD	Geometrische Standardabweichung	-
GSD_{min}	Minimale geometrische Standardabweichung	-
H_0	Nullhypothese	-
H_1	Alternativhypothese	-
k	Regressionskoeffizient (Steigung)	-
M	Gesamtmasse	mg
M_A	Masse A-Fraktion	mg
M_E	Masse E-Fraktion	mg
$MMAD$	Massenbezogener medianer aerodynamischer Durchmesser	μm
μ	Erwartungswert	μm
n	Anzahl an Messwertpaaren (aus A- und E-Staub)	-
o	Variablenanzahl	-
p	Überschreitungswahrscheinlichkeit (p-Wert)	-
$P_3(D_{ae})$	Massenbezogener Anteil von Partikeln mit D zwischen 0 und D_{ae} an G	-
$q_3(D)$	Massenverteilungsdichte	1/μm
ρ	Konstante	-

Symbol	Bezeichnung	Einheit
R	Korrelationskoeffizient	-
$adj.R^2$	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß	-
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
$s_{Fit}(\ln(c_A^*))$	Standardabweichung der angepassten Regressionsfunktion	-
σ	Standardabweichung	-
T	Prozent der gesamten luftgetragenen Partikeln	%
x_i	Gegebener Wert der Beispielvariablen	-
ξ_i	Zufallsvariable	-
$x_1 \dots x_4$	Beispielvariablen $x_1 \dots x_4$	dimensionslos
\hat{y}_i	Vorhersagewert der Beispielvariablen	-
y_i	Beobachtungswert der Beispielvariablen	-
$y_1 \dots y_4$	Beispielvariablen $y_1 \dots y_4$	dimensionslos

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Stäube sind eine der häufigsten Expositionsarten an Arbeitsplätzen. Das gilt insbesondere für industrielle Arbeitsbereiche wie Bergbau, Stein- und Holzbearbeitung, Metallverarbeitung oder Gießereien. Die entstehenden Stäube setzen sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen, die sich in Form, Größe und Dichte unterscheiden. Man unterscheidet zwischen mineralischen, synthetischen, metallischen und organischen Partikeln sowie faserartigen Materialien. Bestimmt von ihren aerodynamischen Eigenschaften dringen die aspirierten Partikeln unterschiedlich tief in die Atemwege ein und lagern sich dort ab, wenn sie nicht ausgeatmet werden können. Abhängig von ihrem aerodynamischen Durchmesser unterscheidet man drei Staubfraktionen: einatembare, thorakale und alveolengängige Stäube [1 bis 3].

Verbleiben die Partikeln über einen längeren Zeitraum in der Lunge, können sie dort schwere Schäden verursachen. Das Gesundheitsrisiko, das mit lungengängigen Stäuben in Zusammenhang steht, ist seit langer Zeit bekannt. Beispielsweise ist bereits im Jahr 1924 ein Artikel in der „Deutschen Medizinischen Wochenschrift“ veröffentlicht worden, in dem das vermehrte Auftreten von sogenannten Staublungen und Tuberkulose bei Bergleuten thematisiert worden ist [4]. Im Laufe der Jahre sind spezielle Formen der Staublung, auch Pneumokoniose genannt, untersucht worden. Als Verursacher gelten verschiedene Staubarten wie z. B. Grafit-, Quarz-, Metall- oder Talkstäube [5 bis 8]. Darüber hinaus sind weitere, durch Stäube verursachte Krankheitsbilder bekannt, darunter Krebserkrankungen der Atemwege [9] sowie Herzkrankheiten (z. B. Herzrhythmusstörungen) [3; 10; 11]. Ein zusätzliches Gesundheitsrisiko entsteht, wenn die aspirierten Stäube giftige Inhaltsstoffe wie Nickel oder Cadmium enthalten.

Früher sind in Deutschland hauptsächlich Messungen zum einatembaren Staub durchgeführt worden. Im Lauf der Jahre ist allerdings festgestellt worden, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe des Staubs in die Atemwege und der Partikelgröße gibt und dass mit abnehmender Partikelgröße eine Staubablagerung in der Lunge begünstigt wird [3]. Als Folge dessen hat man verstärkt Messungen des A-Staubs vorgenommen. Zusätzlich ist im Jahr 1973 der Feinstaubgrenzwert eingeführt worden [12] und seitdem sukzessiv abgesenkt worden. Eine ähnliche Entwicklung ist bei den metallischen Stäuben zu beobachten. In den letzten Jahren ist man ebenfalls dazu übergegangen, den Anteil der metallischen Inhaltsstoffe in der A-Staub-Fraktion zu bestimmen. Seitdem werden verstärkt Parallelmessungen von A- und E-Staub durchgeführt, um das Gesundheitsrisiko

an bestimmten Arbeitsplätzen besser bewerten und ggf. Präventionsmaßnahmen erheben zu können.

Während sich die Voraussetzungen zur Beurteilung der aktuellen Exposition an Industriearbeitsplätzen immer weiter gebessert haben, ist es immer noch schwierig, retrospektive Auswertungen zur Expositionshöhe in den frühen Jahren der Staubmessung zu rekonstruieren, wenn nur Daten einer Staubfraktion vorhanden sind. Dadurch werden auch Beurteilungen von Berufskrankheiten erschwert und Auswertungen limitiert, die im Rahmen von epidemiologischen und toxikologischen Studien durchgeführt werden sollen. Aus diesem Gründen ist eine Möglichkeit zur Umrechnung der beiden Staubkonzentrationen c_A und c_E ineinander wünschenswert.

1.2 Literaturrecherche

1.2.1 Umrechnung Staubfraktionen

Bisher haben sich einige Studien mit dem Thema der Umrechnung von Staubkonzentrationen beschäftigt. In den meisten Fällen werden Umrechnungsmöglichkeiten von sogenanntem „Total Dust“ (der Gesamtheit der Schwebstoffe in der Luft) in einatembaren Staub (E-Staub) in bestimmten Industriezweigen untersucht [13 bis 16]. Dabei wird häufig ein einzelner Zahlenwert als Umrechnungsfaktor angegeben. Andere Studien beschreiben die Umrechnungsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Probennahmesystemen der jeweiligen Staubfraktion [17 bis 20].

Es gibt nur wenige Studien, die sich direkt mit der Umrechnung von A- und E-Staub beschäftigen. Beispielsweise haben *Dahmann et al.* (2007) versucht, A- und E-Staub-Expositionen von Arbeitskräften in alten Uranminen zu rekonstruieren. Allerdings sind dazu keine Berechnungen der Konzentrationen, sondern direkt Messungen mit historischen Messgeräten durchgeführt worden [21].

Einige Studien gehen von einem linearen Zusammenhang der A- und E-Staub-Konzentrationen aus und berechnen einen einfachen Umrechnungsfaktor. So ist beispielsweise in einer Studie von *Notø et al.* (2016) ein Umrechnungsfaktor von 0,085 (c_A / c_E) bei der Zementproduktion bestimmt worden [22]. *Woskie et al.* (2010) beschreiben im Bereich von Bauausführung und Straßenbau im Mittel neunfach höhere E- als A-Staub-Konzentrationen [23]. Darüber hinaus sind A- und E-Staub-Messungen in speziellen Arbeitsbereichen in Krematorien durchgeführt worden, allerdings ohne eine Möglichkeit zur Umrechnung anzugeben [24]. *Lehnert et al.* (2012) haben die Emission von einatembaren und alveolengängigen Partikeln im Schweißrauch untersucht. Dabei sind die ermittelten

Konzentrationen verschiedener Probennahmesysteme verglichen und Umrechnungsfunktionen berechnet worden [25]. In einer Studie von *Okamoto et al.* (1997) werden Umrechnungsfunktionen von E- in A-Staub bei den Tätigkeiten *Mahlen, Pulverförderung, Gießen* und *Schweißen* angegeben [26]. Alle derzeitigen Studien zur Umrechnung von A- und E-Staub beschränken sich auf bestimmte Arbeitsbereiche oder Anwendungsgebiete und sind aus diesem Grund nicht als allgemein gültig anzusehen.

1.2.2 Einflussgrößen

Wie im vorherigen Abschnitt 1.2.1 schon angedeutet worden ist, sind zur Beschreibung des Zusammenhangs beider Staubfraktionen verschiedene Einflussgrößen wichtig.

Wie in zahlreichen Publikationen nachgewiesen worden ist, hat die ausgeübte Tätigkeit am Arbeitsplatz wesentlichen Einfluss auf die Partikelgrößen und damit auf die Konzentration der beprobten Staubfraktionen. So haben beispielsweise *Gomes et al.* (2001) gezeigt, dass Arbeitskräfte in der Eisengießerei bei unterschiedlichen Tätigkeiten verschiedenen A-Staub-Konzentrationen ausgesetzt sind. So ist am Schmelzofen eine Konzentration von $20,47 \text{ mg/m}^3$ gemessen worden, während an der Stranggießanlage $6,58 \text{ mg/m}^3$ festgestellt worden sind [27].

Järvelä et al. (2016) haben die Exposition von Arbeitskräften in der Ferrochrom- und Stahlproduktion untersucht. Bei personengetragenen E-Staub-Messungen ist an der Sinteranlage $1,87 \text{ mg/m}^3$, bzw. $0,17 \text{ mg/m}^3$ am Kaltwalzwerk gemessen worden [28].

Bei der Studie von *Burdorf et al.* (1994) ist die E-Staub-Exposition in schwedischen Bäckereien untersucht worden. Dabei ist aufgefallen, dass Arbeiter am Backofen im Mittel Konzentrationen von $1,17 \text{ mg/m}^3$ ausgesetzt waren, während bei den Teigherstellern $5,46 \text{ mg/m}^3$ festgestellt worden sind [29].

Zusätzlich zur Tätigkeit ist auch das Material eine wichtige Einflussgröße, wenn der Zusammenhang von A- und E-Staub beschrieben werden soll. Abhängig von der Art der Stäube ist mit unterschiedlichen Materialeigenschaften zu rechnen. So unterscheiden sich beispielsweise organische, metallische, mineralische oder synthetische Materialien in ihrer Dichte, Sprödigkeit, Härte oder ihrem thermischen Verhalten. Dies wird auch beim Vergleich verschiedener Studien deutlich: So ist z. B. beim Schleifen von Metall in der Studie von *Ojima* (2007) eine mittlere A-Staub-Konzentration von $7,73 \text{ mg/m}^3$ gemessen worden [30], während von *Akbar-Khanzadeh und Brillhart* (2001) bei vergleichbaren Schleifprozessen von Beton in der Bauindustrie $31,4 \text{ mg/m}^3$ ermittelt worden sind [31]. In der Studie von *Kos et al.* (2004) sind beim Sägen von Holz mit unterschiedlichen Maschinen A-Staub-Konzentrationen bis zu $1,8 \text{ mg/m}^3$ gemessen worden [32]. Im Gegensatz

dazu haben *Flanagan et al.* (2003) mittlere A-Staub-Konzentrationen von $0,76 \text{ mg/m}^3$ beim Sägen von Beton bestimmt [33].

Ergänzend zu Tätigkeit und Material sind weitere Einflussgrößen zur Beurteilung des Zusammenhangs von A- und E-Staub sinnvoll. So werden zur Staubmessung häufig sowohl personengetragene als auch stationäre Messungen durchgeführt. Dabei ist beispielsweise nicht auszuschließen, dass durch den variierenden Abstand zur Emissionsquelle unterschiedliche Staubkonzentrationen ermittelt werden. Ergänzend dazu ist denkbar, dass Messungen mit unterschiedlichen Probennahmesystemen zu variierenden Konzentrationshöhen und damit zu einer systematischen Verzerrung der Ergebnisse und deren Fehlinterpretationen führen könnten. Darüber hinaus ist durch die sukzessiven Grenzwertabsenkungen von A- und E-Staub in Deutschland sowie die Einführung von Präventionsmaßnahmen in Industriebetrieben nicht auszuschließen, dass ein Trend der Konzentrationsmesswerte in Abhängigkeit vom Probennahmejahr erkennbar ist. Eine ausführlichere Betrachtung möglicher Einflussgrößen erfolgt in Abschnitt 3.1.2 (Variablenselektion) dieser Arbeit.

1.2.3 Lineare Regression

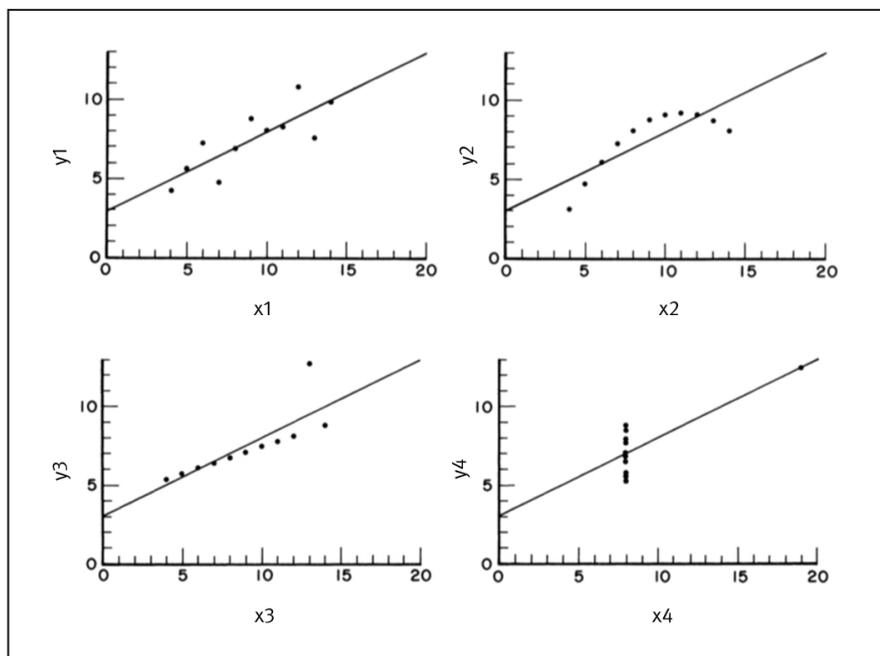
Zur Beschreibung des Zusammenhangs von Staubfraktionen werden in den meisten Studien lineare Regressionsanalysen durchgeführt (z. B. [11; 22; 25; 26]). Dabei werden zur Beschreibung der Modellgüte das Bestimmtheitsmaß (R^2) und der Korrelationskoeffizient (R) verwendet. Dabei gilt es zu beachten, dass ein hoher Korrelationskoeffizient (>0) nicht gleichbedeutend mit einem linearen Zusammenhang der beiden Variablen in der Regressionsanalyse ist [34]. So hat *Francis Anscombe* im Jahr 1973 vier Datensätze mit identischen Korrelationskoeffizienten konstruiert, die zusätzlich über die gleichen Mittelwerte, Varianzen (beider betrachteten Variablen) und lineare Regressionsfunktion verfügen. Jedoch unterscheiden sich diese vier Punktmengen grundlegend voneinander, wenn sie in einem Diagramm aufgetragen werden [34; 35]. Die Punktmengen werden in Abbildung 1.1 dargestellt und sind unter dem Namen „Anscombe-Quartett“ bekannt.

Im ersten Streudiagramm (Abbildung 1.1, oben links) scheint der lineare Zusammenhang zwischen x_1 und y_1 korrekt abgebildet zu werden. Im zweiten Diagramm (oben rechts) wird ein Zusammenhang zwischen x_2 und y_2 dargestellt, der allerdings nicht linear ist. Der dritte Fall (unten links) bildet einen linearen Zusammenhang der Variablen ab, jedoch ist ein Ausreißer zu erkennen, genauso wie im vierten Diagramm. Allerdings liegen dort zusätzlich alle Punkte (mit Ausnahme des Ausreißers) unmittelbar übereinander. In allen Fällen resultiert die gleiche lineare Regressionsgleichung mit dem gleichen

Korrelationskoeffizienten; allerdings bildet nur das erste Streudiagramm einen wirklich linearen Zusammenhang ab. Durch diese Darstellung wird deutlich, dass es notwendig ist, untersuchte Daten nicht nur mit statistischen

Tests bzw. Regressionsanalysen zu beurteilen, sondern auch der grafischen Beurteilung der Datensätze zur Überprüfung der Plausibilität eine tragende Rolle zukommt.

Abbildung 1.1:
Anscombe-Quartett [35]



1.3 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund, dass sich bislang nur wenige Studien im Arbeitsschutzsektor mit der Umrechnung von einatembarem in alveolengängigen Staub beschäftigt haben und diese aber für retrospektive Auswertungen zu Expositionshöhen oder zur Beurteilung von Berufskrankheiten notwendig sind, soll in dieser Arbeit die Möglichkeit einer Umrechnung dieser beiden Staubfraktionen aufgezeigt werden.

Durch das hohe Gesundheitsrisiko, das durch metallische Stäube an Arbeitsplätzen verursacht wird, ist eine Untersuchung metallischer Inhaltsstoffe in A- und E-Staub ebenfalls sinnvoll. In dieser Arbeit soll ermittelt werden, ob bei ausgewählten metallischen Inhaltsstoffen ebenfalls eine Umrechnung des Stoffanteils zwischen den Fraktionen möglich ist.

Falls diese Möglichkeiten zur Umrechnung gegeben sind, soll gezeigt werden, ob generell ein Faktor ausreichend ist, um alle Arbeitsbereiche zu beschreiben, oder ob durch verschiedene Einflussgrößen wie beispielsweise *Tätigkeit* oder *Material* unterschiedliche Umrechnungsfaktoren bzw. -funktionen resultieren. Der statistische Zusammenhang von einatembarem und alveolengängigem Staub soll mithilfe der linearen Regressionsanalyse beschrieben und zusätzlich grafisch auf Plausibilität überprüft werden.

Sofern Umrechnungsfunktionen entwickelt werden können, wird darüber hinaus an mathematisch exakt zu beschreibenden Partikelgrößenverteilungen mittels Simulationsrechnungen gezeigt, unter welchen Bedingungen Umrechnungsfunktionen bzw. -faktoren überhaupt existieren können und wie diese Funktionen von den Parametern der Partikelgrößenverteilungen abhängen.

2 Grundlagen

Das Fundament dieser Arbeit bilden Gefahrstoffmesswerte, die über sechs Jahrzehnte in verschiedenen Betrieben an unterschiedlichen Arbeitsplätzen in ganz Deutschland ermittelt worden sind. Um die einzelnen Schritte und Methoden dieser Arbeit besser nachvollziehen zu können, ist es notwendig zunächst einige Grundlagen zu erläutern. Dazu werden Begriffe aus dem Gefahrstoffbereich beschrieben und die toxikologische Relevanz, das Gefährdungspotenzial und der rechtliche Rahmen der betrachteten Gefahrstoffe aufgezeigt. Darüber hinaus wird der Verlauf einer Gefahrstoffmessung von der Auftragserteilung bis zur Archivierung in der Datenbank beschrieben.

2.1 Begriffsbestimmungen

2.1.1 Aerodynamischer Durchmesser

Um die Größe und Beschaffenheit von Partikeln zu bewerten, ist die Angabe der geometrischen Größe allein nicht ausreichend. Um luftgetragene Partikeln näher beschreiben zu können, wird in der Partikelmesstechnik die abstrakte Größe des aerodynamischen Durchmessers (D_{ae}) verwendet. Dieser ist definiert als der Durchmesser einer

kugelförmigen Partikel mit einer Dichte von $1,0 \text{ g/cm}^3$ und der gleichen stationären Sinkgeschwindigkeit wie die betrachteten Partikeln in ruhender Luft unter der Annahme gleicher Temperatur, Druck und relativer Feuchte [2].

2.1.2 Einatembarer Staub

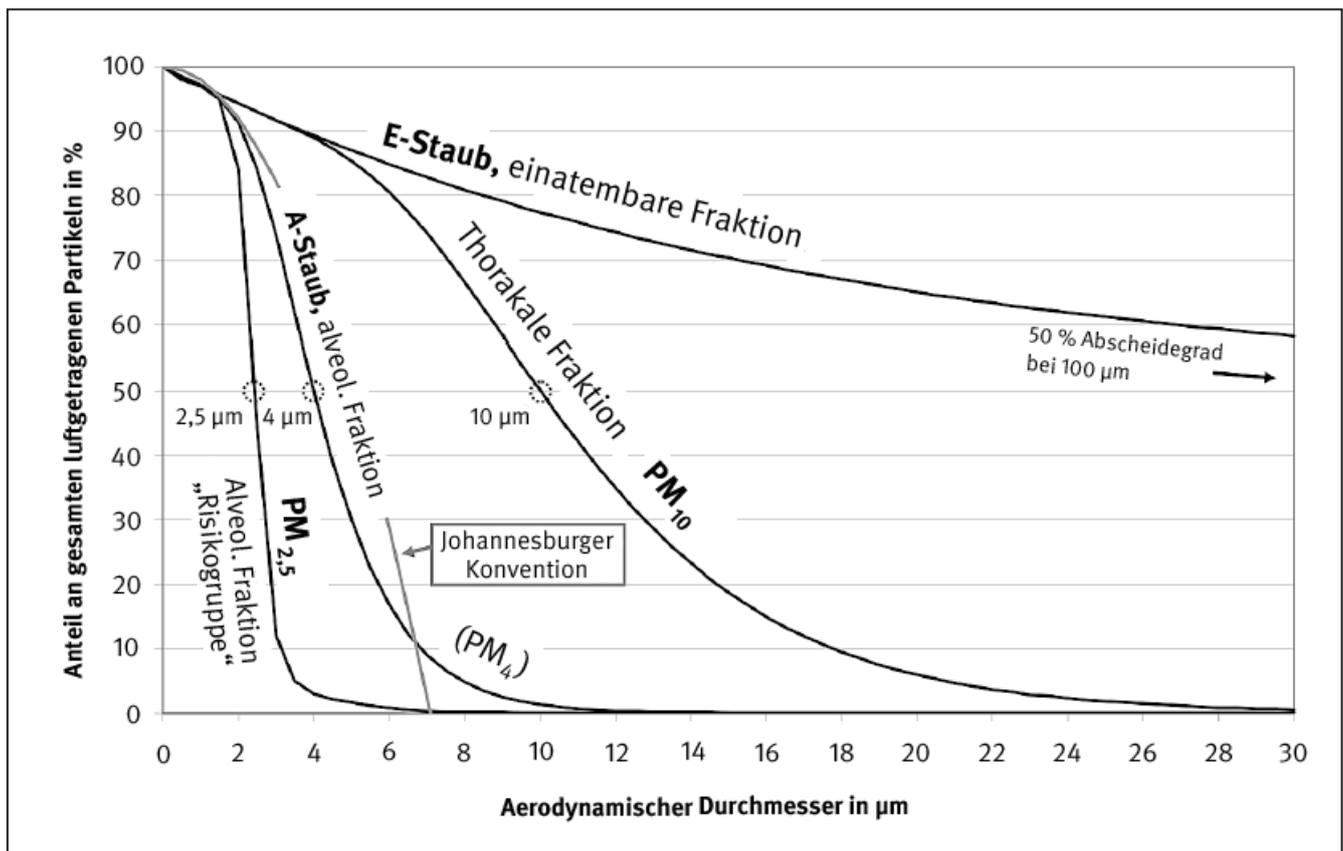
Einatembarer Staub, auch E-Fraktion oder E-Staub genannt, bezeichnet alle Partikeln, deren aerodynamische Durchmesser im Größenbereich von wenigen Nanometern bis ca. $100 \mu\text{m}$ liegen [1; 36] (Abbildung 2.1). Der Anteil des E-Staubs aus der Gesamtheit der Schwebstoffe lässt sich mit folgender Konvention berechnen [1]:

$$E = 0,5 \cdot \left(1 + \exp \left[-0,06 \cdot \frac{D_{ae}}{\mu\text{m}} \right] \right) \quad (2.1)$$

Wobei D_{ae} den aerodynamischen Durchmesser beschreibt. Die größeren luftgetragenen Partikeln ($D_{ae} > 30 \mu\text{m}$) werden über Mund und Nase aufgenommen und in den Atemwegen im Kopf zwischen Nase und dem Kehlkopf abgelagert [1; 3]. Vor 1997 war die E-Fraktion unter dem Namen „Gesamtstaub“ bekannt [38].

Abbildung 2.1:

Gefahrstoffrelevante Staubfraktionen und deren Abscheidegrade in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser [37]



2.1.3 Alveolengängiger Staub

Kleinere Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von 0,5 bis 15 μm werden alveolengängiger Staub, A-Staub oder A-Fraktion genannt, da sie sich ebenfalls zwischen Luftröhre und den Bronchien ablagern können und bis in die Alveolen der Lunge (D_{ae} ca. 2 μm) vordringen. Die meisten der größeren Partikeln können wieder ausgeatmet werden. Jedoch gilt: Je kleiner der D_{ae} , desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Ablagerung in den Alveolen [3]. Bis 1997 wurde diese Fraktion im Arbeitsschutz auch als „Feinstaub“ bezeichnet und mithilfe der Johannesburger Konvention von 1959 (Abbildung 2.1) definiert [37].

2.2 Berufsbedingte Krankheiten

Die meisten Berufskrankheiten in Verbindung mit Stäuben betreffen die Lunge. Am häufigsten ist die Pneumokoniose, die auch „Staublunge“ (z. B. im Bergbau, verursacht durch den Kohlenstaub) oder „Silikose“ (BK Nr. 4101) genannt wird, wenn eine zu hohe Feinstaubbelastung der Lunge durch Quarzsand vorliegt [38]. Arbeitskräfte, die einer erhöhten Quarzexposition ausgesetzt sind, haben darüber hinaus ein höheres Risiko an chronischen Lungenerkrankungen, Tuberkulose, rheumatischer Arthritis oder Lungenkrebs zu erkranken [39] (BK Nr. 4 101 bis 4 115). Lungen- und alveolengängige Partikeln können nach einer Schleimhautentzündung zu akuter Bronchitis und in der Folge zu Asthma führen [40]. Durch eine chronische Lungenentzündung (Bronchiolitis) kann es zu einer Verengung der Atemwege kommen, aus der sich Lungenemphyse bilden können [41]. In den letzten sechs Jahren (2013 bis 2018) ist die Anzahl an anerkannten Berufskrankheiten von 22,7 % (3 553 von 15 656 Fällen im Jahr 2013) auf 15,5 % (3 069 von 19 748 Fällen im Jahr 2018) kontinuierlich gesunken. Todesfälle, die auf die Krankheiten Quarzstaublunge, Siliko-Tuberkulose oder Asbestose zurückzuführen sind, haben in den letzten sechs Jahren im Mittel 20,8 % der gesamten Todesfälle infolge einer Berufskrankheit ausgemacht (nach Auswertungen des DGUV Referats, Statistik vom 23. Januar 2020).

In vielen Fällen führen nicht nur die Staubpartikeln selbst, sondern auch deren Inhaltsstoffe zu Erkrankungen. Dies gilt insbesondere für Metallstäube, da diese in einigen Fällen toxisch oder kanzerogen sind. Spezielle Formen der Pneumokoniose sind beispielsweise Berylliose [42] und Siderose [43], die durch Beryllium- bzw. Eisenstaub verursacht werden. Eine Entzündung der Lungenbläschen (die sogenannte Lungenfibrose) kann durch Allergene ausgelöst werden, wie beispielsweise durch Chrom und Kobalt, wenn diese als Stäube in die Lunge gelangen [44]. Die Inhalation von Bleistaub, Quecksilberdampf oder anderen aerosolförmigen Schwermetallen und Schwermetallver-

bindungen führt häufig zu Vergiftungen durch Resorption in der Lunge und im Magen-Darm-Trakt. Zudem sind viele dieser Verbindungen (z. B. Berylliumoxid oder Cadmiumcarbonat) kanzerogen [45]. Diese Erkrankungen werden in der Liste der Berufskrankheiten als „Durch chemische Einwirkungen verursachte Krankheiten – Metalle und Metalloide“ mit den Ziffern 1101 bis 1110 aufgeführt. Der Anteil an den anerkannten Berufskrankheiten für Erkrankungen dieser Art innerhalb der letzten sechs Jahre liegt bei 0,1 % (nach Auswertungen des DGUV-Referats Statistik vom 23. Januar 2020).

Zur Prävention und zum Schutz der Arbeitskräfte sind in den vergangenen Jahren in Deutschland Grenzwerte für einzelne Substanzen und Stoffklassen eingeführt worden, die regelmäßig dem Stand der Technik angepasst und deren Einhaltung an den Arbeitsplätzen mithilfe von Expositionsmessungen überprüft werden [45; 46].

2.3 Grenzwerte

Das Gefährdungspotenzial bei der Aspiration von Stäuben am Arbeitsplatz ist schon seit vielen Jahren bekannt und thematisiert worden. So hat beispielsweise *Bernado Ramazzini* erstmals 1 713 Asthmaerkrankungen von Arbeitskräften in Bäckereien beschrieben [47].

Demnach ist schon früh erkannt worden, dass nicht nur Stäube mit toxischen oder krebserzeugenden Inhaltsstoffen ein hohes Gesundheitsrisiko bergen, sondern dass sich auch schwerlösliche Stäube ohne toxische Inhaltsstoffe im Atemtrakt ablagern und langfristig zu Erkrankungen führen können. Daher sind in Deutschland Grenzwerte für einatembare bzw. alveolengängige Stäube eingeführt worden. Im Nachfolgenden wird die Entwicklung der Grenzwerte für beide Fraktionen tabellarisch dargestellt (Tabelle 2.1).

Erstmals ist 1968 in Deutschland ein Grenzwert von 15 mg/m^3 für inerte Stäube erhoben worden, welche zu dieser Zeit als Ursache für arbeitsbedingte Erkrankungen der Lungen- und Atemwege erkannt worden sind [53]. Als inerte Stäube werden solche bezeichnet, die keine toxischen Wirkungen oder Krankheitserscheinungen im Körper hervorrufen [37]. 1973 ist ein Feinstaubgrenzwert von 8 mg/m^3 ergänzt worden. Diesen Wert hat man im Jahr 1983 erstmals unter der Bezeichnung „Allgemeiner Staubgrenzwert“ auf 6 mg/m^3 abgesenkt [49]. Mit der Einführung der DIN EN 481 sind die Begriffe von Gesamt- und Feinstaub neu definiert und die Konventionen für die alveolengängige und einatembare Staubfraktion festgelegt worden. Heute gelten folgende Grenzwerte: 1,25 mg/m^3 für alveolengängigen Staub [52] und 10 mg/m^3 für einatembaren Staub [51].

Tabelle 2.1:
Zeitlicher Verlauf der Staubgrenzwerte in Deutschland

Jahr	Bezeichnung	Grenzwert in mg/m ³
1968 [48]	Inerte Stäube	15
1973 [12]	Inerte Stäube (Feinstaub)	8
1983 [49]	Allgemeiner Staubgrenzwert (Feinstaub)	6
2001 [50]	Allgemeiner Staubgrenzwert (A-Staub) für spezielle Tätigkeiten und Arbeitsbereiche (gemäß Nr. 2.4, Abs. 8-10 der TRGS 900)	6
2001 [50]	Allgemeiner Staubgrenzwert (A-Staub) im übrigen	3
2001 [50]	Allgemeiner Staubgrenzwert (E-Staub) für spezielle Stoffe (gemäß Nr. 2.4, Abs. 7 der TRGS 900)	10
2001 [50]	Allgemeiner Staubgrenzwert (E-Staub) für alle übrigen Stoffe	10
2006 [51]	Allgemeiner Staubgrenzwert (A-Staub)	3
2006 [51]	Allgemeiner Staubgrenzwert (E-Staub)	10
2014 [52]	Allgemeiner Staubgrenzwert (A-Staub) gültig seit 1. Januar 2019	1,15

Zusätzlich zu den Grenzwerten der Staubfraktionen sind über die Jahre Arbeitsplatzgrenzwerte und weitere Beurteilungsmaßstäbe für verschiedene Gefahrstoffe abgeleitet worden. Tabelle 2.2 zeigt die derzeit gültigen Arbeitsplatzgrenzwerte und Beurteilungsmaßstäbe zu einigen in dieser Arbeit behandelten metallischen Staubinhaltsstoffen. Bei krebserzeugenden Stoffen wird das risikobezogene Maßnahmenkonzept angewendet [46]. Man hat zur Minimierung des Risikos beim Umgang mit diesen Stoffen Risikogrenzen festgelegt und auf deren Basis stoffspe-

zifische Konzentrationswerte abgeleitet [46]. Dies sind zum einen die Toleranz- (TK) und zum anderen die Akzeptanzkonzentration (AK). Werden an einem Arbeitsplatz Stoffkonzentrationen oberhalb der Toleranzkonzentration gemessen, so spricht man von einem „hohen, nicht hinnehmbaren Risiko der Krebserkrankung des Arbeiters“ (Risiko der Erkrankung: 4 : 1 000) [46]. Bei Stoffkonzentrationen oberhalb der Akzeptanzkonzentration, spricht man hingegen von einem „niedrigen, hinnehmbaren Risiko“ (4 : 100 000) [46].

Tabelle 2.2:
Derzeit gültige Grenzwerte für metallische Inhaltsstoffe in Deutschland

Bezeichnung	Gültige Grenzwerte (z. B. Beurteilungsmaßstäbe, AGW) in mg/m ³
Bariumverbindungen, löslich (außer Bariumoxid und Bariumhydroxid)	0,5 (in E-Staub)
Beryllium und seine anorganischen Verbindungen	0,00006 (in A-Staub) 0,00014 (in E-Staub)
Blei und seine anorganischen Verbindungen	0,1 [54]
Cadmium und Cadmium-Verbindungen	AK: 0,00016 (in A-Staub) TK: 0,001 (in E-Staub) [46]
Chrom und anorganische Chrom(II)- und Chrom(III)-Verbindungen (ausgenommen namentlich genannte)	2,0 (in E-Staub)
Chrom(III)sulfat, basisch	0,012 (in A-Staub)
Chrom (VI)-Verbindungen	TK: 0,001 (in E-Staub) [46]
Cobalt und Cobaltverbindungen	AK: 0,0005 (in A-Staub) TK: 0,005 (in A-Staub) [46]
Quecksilber	0,02
Quecksilberverbindungen, anorganische	0,02 (in E-Staub)
Mangan und seine anorganischen Verbindungen	0,02 (in A-Staub) 0,2 (in E-Staub)
Nickel und Nickelverbindungen	0,030 (in E-Staub)
Antimonsulfid	0,006 (in A-Staub)
Antimon(III)oxid	0,006 (in A-Staub)

2.4 Ablaufschema einer Messung

2.4.1 Datenerhebung

Die Messwerte, die dieser Arbeit zugrunde liegen, sind über die letzten Jahrzehnte hinweg im Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) an verschiedenen Arbeitsplätzen erhoben worden. Seit dem Jahr 1972 existiert das Messsystem Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU), mit dem beispielsweise die Exposition gegenüber Gefahrstoffen und Messdaten an Arbeitsplätzen ermittelt werden [55]. Das System ist etabliert worden, um die Unfallversicherungsträger (UV-Träger) bei ihrer Aufgabe der Beurteilung von Berufskrankheiten, Untersuchung und Verhütung von Arbeitsunfällen und Gesundheitsgefährdungen zu unterstützen [55]. Zum MGU zählen neben dem IFA gewerbliche Berufsgenossenschaften und Unfallkassen der öffentlichen Hand sowie Sozialversicherungen [56; 57]. Zur Expositionsbeurteilung werden jährlich mehrere hundert Arbeitsplatzmessungen in verschiedenen deutschen Firmen durchgeführt [55; 56].

Arbeitsplatzmessungen werden von den sogenannten autorisierten Mitarbeitern der Messtechnischen Dienste durchgeführt. Diese sind im Umgang mit den Probennahmesystemen und -trägern speziell geschult. Zudem finden jedes Jahr Seminare und Workshops statt, die für eine umfassende Personalqualifizierung sorgen [56]. Dabei können Messtechniker ebenfalls Verbesserungsvorschläge zur Qualitätssicherung einbringen.

Der Zweck solcher Messungen ist vielfältig. Beispielsweise können dadurch spezielle Krankheitsbilder an Arbeitsplätzen überprüft werden. Weitere Gründe können Expositions-Monitorings, die Überprüfung von Schutzmaßnahmen oder die Beurteilung einer Arbeitsplatzgestaltung sein [58; 59]. Die meisten Daten, die in dieser Arbeit verwendet worden sind, wurden erhoben, um die Expositionssituation in einem Betrieb zum Zeitpunkt der Messung zu überprüfen und zu ermitteln, ob die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten worden sind. In wenigen Ausnahmefällen wurden Wiederholungsmessungen zur Überprüfung der Arbeitsplatzsituation am selben Arbeitsplatz durchgeführt.

Bevor die eigentliche Messung durchgeführt werden kann, müssen spezielle Vorbetrachtungen getroffen und Grunddaten erhoben worden sein. In erster Linie müssen die konkreten Gefahrstoffe, die sich an einem Arbeitsplatz befinden, identifiziert, deren Gefährdungspotenzial eingeschätzt und die mit den Stoffen verbundenen Tätigkeiten beschrieben werden.

Im nächsten Schritt müssen Grunddaten zur Messung erhoben werden. So beispielsweise welche Schutzmaßnahmen oder -einrichtungen vor Ort vorhanden sind, wie viele Emissionsquellen vorliegen oder wie sich der Expositionsverlauf gestaltet [58; 59]

In Voruntersuchungen wird überprüft, ob überhaupt eine nennenswerte Gefährdung des Mitarbeiters bei den durchzuführenden Tätigkeiten vorliegt (Gefährdungsbeurteilung). Im Anschluss daran erfolgen die Messungen am Arbeitsplatz nach einer gewissen Messstrategie [58; 59]. Darunter versteht man die Auswahl sinnvoller Messpunkte (räumlich und personell), die Auswahl der Messbedingungen (z. B. ob eine Expositionsmessung repräsentativ für die Schicht eines Arbeiters sein soll), die Festlegung eines Probenahmeplans und eines geeigneten Messverfahrens [58; 59]. Das Kriterium der Messbedingung für diese Arbeit war, dass die Expositionsmessungen repräsentativ für die Schicht eines Arbeiters sein sollte.

Die Probenträger und Probennahmesysteme für die Messung werden den Messtechnikern vom IFA bereitgestellt. Bevor die Geräte an die Messtechniker ausgegeben werden, erfolgt vom Messgerätepool des IFA eine routinemäßige Überprüfung und Kalibration zur Qualitätssicherung. Außerdem werden die eingesetzten Probenträger regelmäßig auf Unversehrtheit überprüft. Die Sammelmedien werden chargenweise auf ihre Blindwerte hin getestet und müssen den Qualitätsansprüchen der Analytik genügen.

Nach Abschluss der Arbeitsplatzmessung werden die beaufschlagten Probenträger an die Labors des IFA weitergeleitet. Die Probennahmesysteme werden gereinigt und nach Rückgabe an den Messgerätepool des IFA erneut auf ihre korrekte Funktion hin überprüft und kalibriert.

Abbildung 2.2 zeigt ein Ablaufschema der Aufgaben, die aus der Sicht des IFA bei einer Gefahrstoffmessung zu berücksichtigen bzw. zu überwachen sind.

2.4.2 Probennahmesysteme (PS)

Für die Messungen der verschiedenen Staubfraktionen werden unterschiedliche Probennahmesysteme bzw. unterschiedliche Probennahmeköpfe verwendet. Messungen können stationär oder personengetragen durchgeführt werden. Diese Variable wird im Folgenden als Probenahmeart (PA) bezeichnet. In Tabelle 2.3 werden die in dieser Arbeit relevanten Probennahmesysteme mit den betrachteten Messparametern aufgeführt.

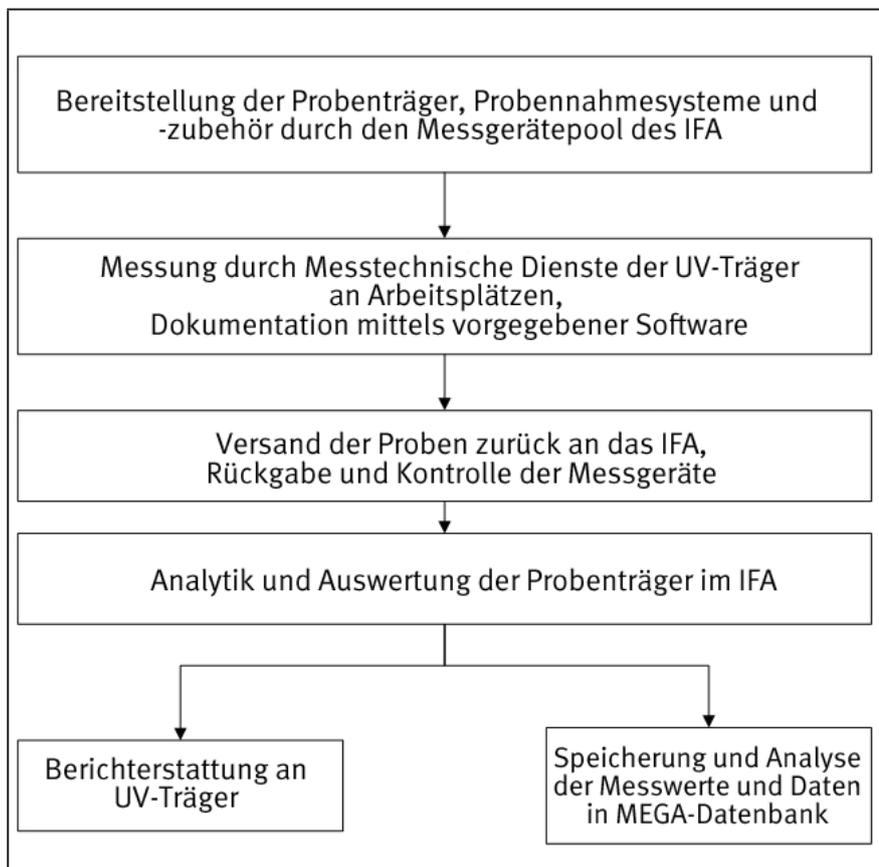


Abbildung 2.2:
Ablaufschema einer Arbeitsplatzmessung

Tabelle 2.3:

Aufstellung der relevanten Probennahmesysteme und -köpfe mit Spezifikationen und Anzahl (n) in dieser Arbeit

Bezeichnung	Volumenstrom in l/min	Probennahmeart	Gemessene Staubfraktion	Anzahl der Messungen (n)
FSP-Casella-Zyklon	2	personengetragen	A	2
FSP-2	2	stationär/personengetragen	A	622
FSP-10	10	stationär/personengetragen	A	9 269
G-Viellochkopf	2	personengetragen	E	2
GSP	3,5	stationär/personengetragen	E	7 390
GSP-10	10	stationär/personengetragen	E	2 872
MPG II	46,7	stationär	A	7
PGP-EA	3,5	personengetragen	A und E	26
PM4-F	66,7	stationär	A	1 188
PM4-G	66,7	stationär	E	830
VC-25 F	375	stationär	A	3 988
VC-25 G	375	stationär	E	4 000
VC-25 I	375	stationär	A	18

Stationäre Probennahmesysteme

Stationäre Systeme sind in der Vergangenheit häufig eingesetzt worden, nicht zuletzt auch, weil sie aufgrund der in der Regel höheren Volumenströme eine bessere Empfindlichkeit des Gesamtverfahrens (niedrige Bestimmungsgrenzen) ermöglichen. Heute ist die personengetragene Messung die messstrategische Grundanforderung

[60]. Stationäre Messungen sind aus den genannten Gründen immer noch zulässig, wenn nur durch sie die Mindestanforderung an Messverfahren zur Überwachung von Arbeitsplatzgrenzwerten erfüllt werden können.

Das stationäre Messgerät Gravikon VC-25 wird am Stromnetz betrieben und kann mit unterschiedlichen Probennahmeköpfen eingesetzt werden.

- Zur Messung der alveolengängigen Fraktion gibt es zwei Ausführungen, den A-Staub-Kopf, der mit einem Membranfilter zusammen einen Impaktor bildet (Abbildung 2.3), und eine Kombination aus dem A-Staub-Kopf mit einem vorgeschalteten Impaktor (in Tabelle 2.3 mit „I“ gekennzeichnet, siehe Abbildung 2.4) [61].
- Das VC-25 G ist ein Messgerät mit E-Staub-Kopf, bei dem die Luftansaugung über einen Ringspalt auf einen Messfilter erfolgt [63] (Abbildung 2.5). Das VC-25 G gilt als Standardmessgerät und dient als Referenzverfahren bei E-Staub-Messungen [63]. Das Gravikon PM4 wird ebenfalls zu Messungen in beiden Staubfraktionen mit unterschiedlichen Probennahmeköpfen eingesetzt (Abbildung 2.6).

Abbildung 2.3:
A-Staub-Probennahmekopf für das VC-25;
Filterdurchmesser: 150 mm [62]



Abbildung 2.4:
A-Staub-Probennahmekopf mit Impaktor für
das VC-25; Filterdurchmesser: 150 mm [62]



Abbildung 2.5:
VC-25 mit E-Staub-Probennahmekopf;
Filterdurchmesser: 150 mm [62]



Abbildung 2.6: Messgerät Gravikon PM4 [64]



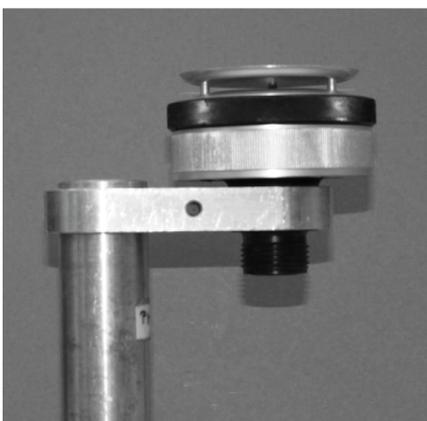
- Das Messgerät PM4-F verfügt über einen Zyklon als Vorabscheider und wird hauptsächlich an mobilen Arbeitsplätzen (beispielsweise auf Baustellenfahrzeugen) verwendet, da es über eine interne Stromversorgung verfügt [61] (Abbildung 2.7).
- Der Probennahmekopf für den E-Staub wird durch eine verschraubbare Filterkassette gebildet. Die Oberseite der Kassette ist ein Ringspalt in Form einer Ansaugdüse, durch die das Probenvolumen gesammelt wird [63] (Abbildung 2.8).

Das MPG II-System gilt als Standardmessgerät und dient als Referenzverfahren zur Messung von alveolengängigen Stäuben [61]. Auch bei diesem Messgerät gibt es einen Vorabscheider, der aus einer bestimmten Anzahl parallel in gleichen Abständen angeordneter Platten besteht. Der Abstand der Platten ist dabei so definiert, dass nur bestimmte Partikeln bei einem spezifischen Nennvolumenstrom auf den Platten abgelagert werden [61].

Abbildung 2.7:
A-Staub-Probennahmekopf für das Gravikon PM4
Messgerät; Filterdurchmesser: 70 mm [64]



Abbildung 2.8:
E-Staub-Probennahmekopf für das Gravikon PM4
Messgerät; Filterdurchmesser: 70 mm [64]



Personengetragene Probennahmesysteme

Bei der Durchführung von Messungen an der Person werden hauptsächlich die Feinstaubprobennahmesysteme (FSP) und die Gesamtstaubprobennahmesysteme (GSP) verwendet. Für die Probennahme des A-Staubes werden die Grobanteile über einen Vorabscheider (Zyklon) abgetrennt und die alveolengängigen Anteile auf einem Membranfilter abgeschieden [61] (Abbildungen 2.9 und 2.10 auf Seite 30).

Bei der E-Staub-Messung entfällt die Vorabscheidung mittels Zyklon und die Stäube werden direkt über einen Ansaugkegel mit geeigneter Ansaugcharakteristik auf einem Filter gesammelt [63] (Abbildung 2.11 auf Seite 30). FSP und GSP werden auch für stationäre Messungen an Arbeitsplätzen genutzt.

In seltenen Fällen wird zur gleichzeitigen Probennahme von A- und E-Staub das personengetragene Probennahmesystem (PGP)-EA hauptsächlich bei Messungen mit Schweißrauch eingesetzt [67] (Abbildungen 2.12 und 2.13 auf Seite 31).

Abbildung 2.9:
Aufbau des FSP für einen Volumenstrom von 2 l/min;
Filterdurchmesser: 37 mm [65]

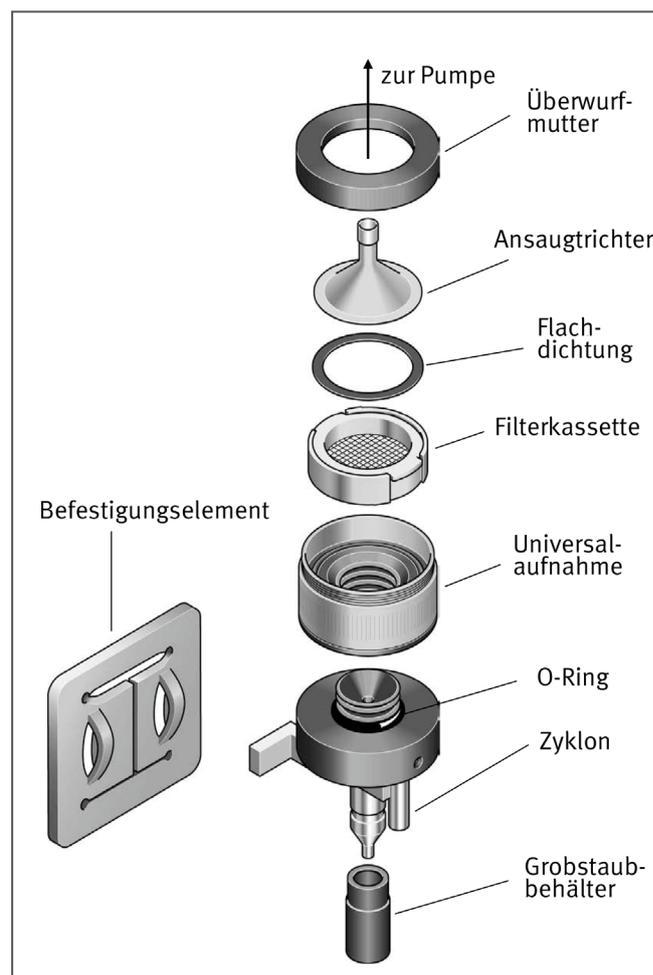


Abbildung 2.10:
 Aufbau des FSP für einen Volumenstrom von 10 l/min;
 Filterdurchmesser: 37 mm [65]

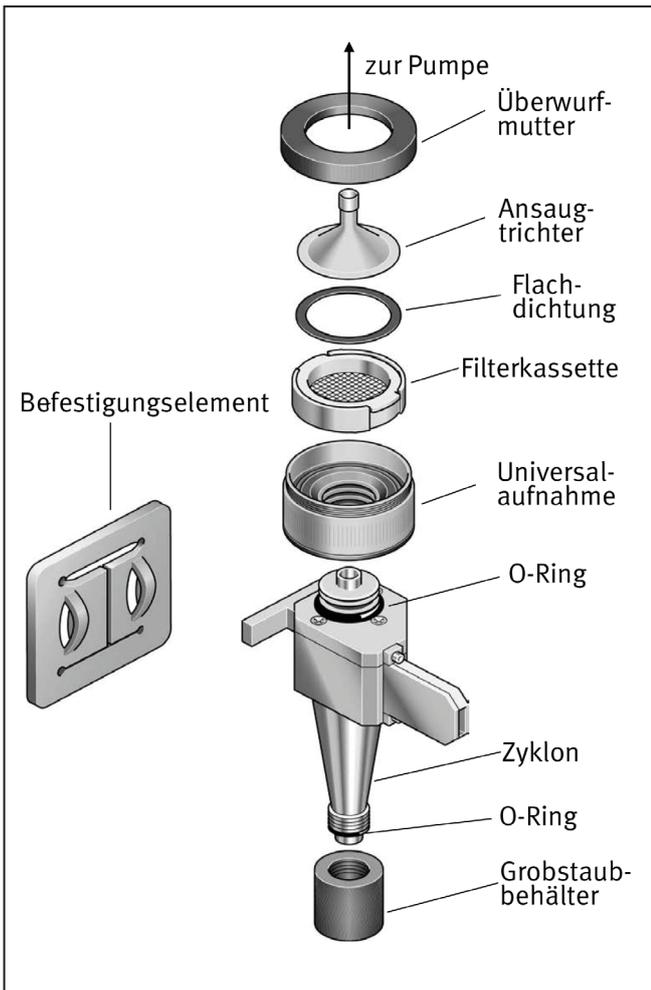


Abbildung 2.11:
 Aufbau des GSP; Filterdurchmesser: 37 mm [66]

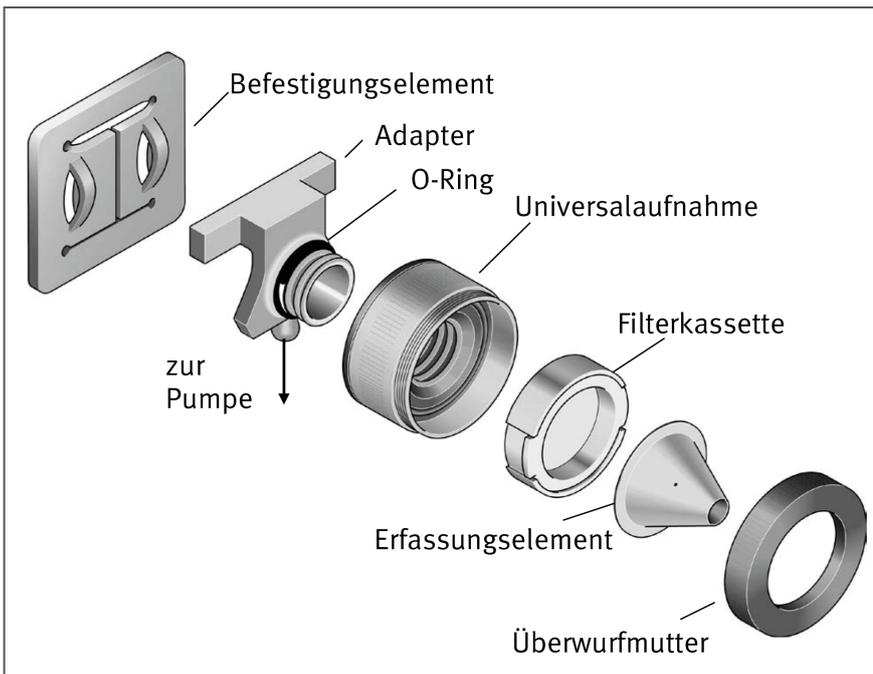


Abbildung 2.12:
 Aufbau des PGP-EA Systems zur gleichzeitigen Messung von A- und E- Staub;
 Durchmesser eingesetzter PU-Schaum: 20 mm; Filterdurchmesser: 37 mm [68]

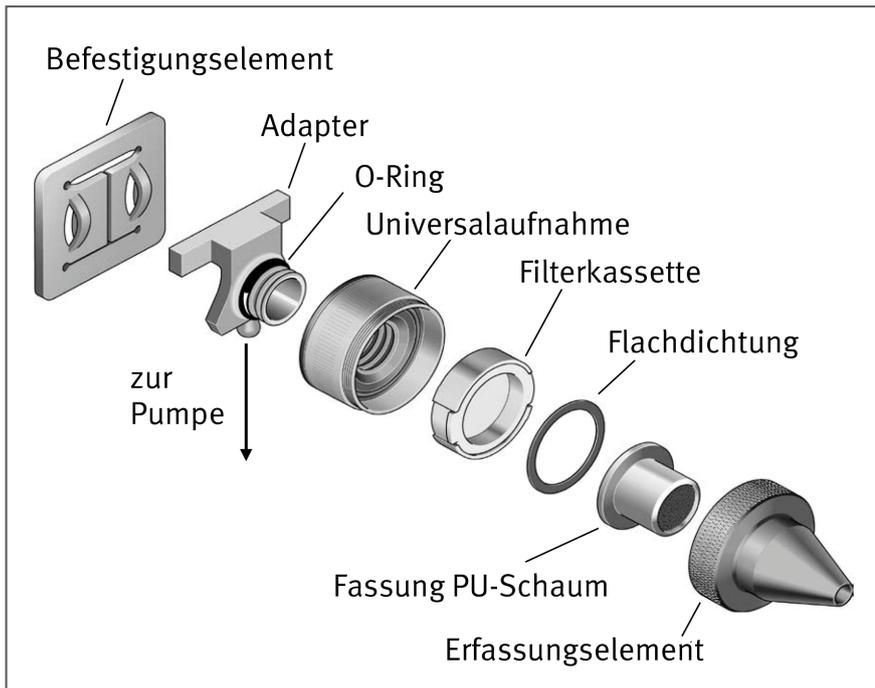
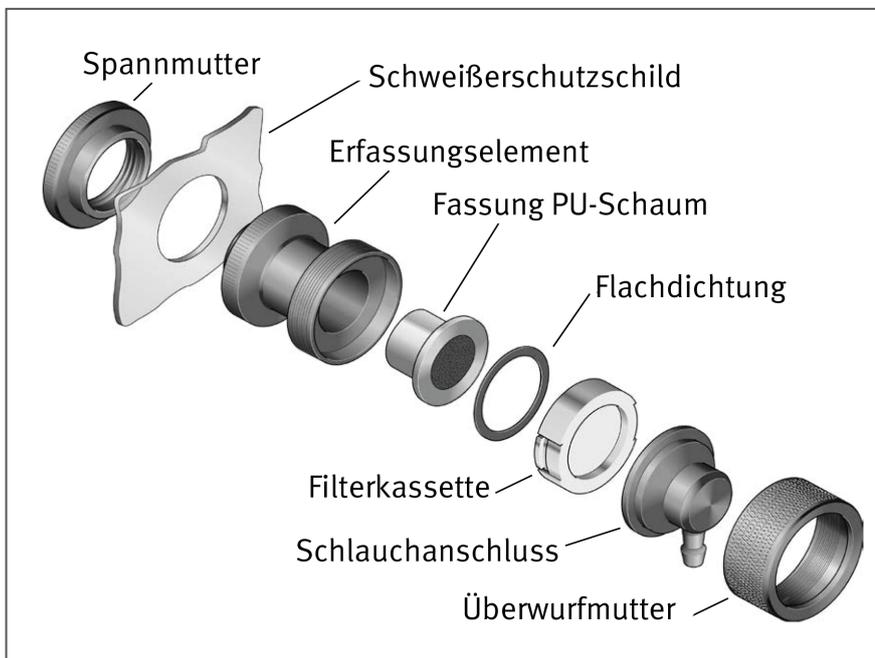


Abbildung 2.13:
 Aufbau des PGP-EA Systems zur gleichzeitigen Messung von A- und E-Staub in der
 Spezialausführung zur Messung am Schweißerschutzschild; Durchmesser eingesetzter
 PU-Schaum: 20 mm; Filterdurchmesser: 37 mm [68]



2.4.3 Analytik der Probenträger

Die Bestimmung der Staubkonzentrationen erfolgt hauptsächlich über eine gravimetrische Auswertung der belegten Filter unter Berücksichtigung des während der Messung angelegten Volumenstroms und der Messdauer. Zur quantitativen Bestimmung der metallischen Inhaltsstoffe werden nach Aufschluss, Lösung und Extraktion der Metalle verschiedene analytische Verfahren eingesetzt. Insbesondere werden die Methoden Atomabsorptionsspektroskopie (AAS), Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF), Photometrie (UV-VIS), Flüssigchromatographie und Atomemissionsspektrometrie (AES) verwendet. In den letzten Jahren ist die Analytik durch eine weitere Analysetechnik, der Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS), ergänzt worden, die eine robuste Multielementanalyse ermöglicht und dabei niedrigere Nachweisgrenzen erreichen kann [69].

2.4.4 Datenbank

Die IFA Expositionsdatenbank MEGA (Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz) existiert seit dem Jahr 1972 und enthält durch die Nach Erfassung von archivierten Datensätzen Messwerte bis aus dem Jahr 1961 [57]. Die dort enthaltenen Messdaten sind auf der Rechtsgrundlage des Sozialgesetzbuches VII von allen messtechnischen Diensten, die dem MGU angeschlossen sind, erhoben worden [55].

Bei den Messungen an deutschen Arbeitsplätzen werden von Messtechnikern Informationen zum Einsatzstoff, dem betrieblichen Arbeitsbereich, Arbeits- und Produktionsverfahren, Schutzmaßnahmen, der Expositionssituation und den Bedingungen der Probenahme in der Datenbank

hinterlegt [57; 70]. Sobald die Messung abgeschlossen ist, werden die Proben zur weiteren Bearbeitung an das IFA oder andere MGU-Labore weitergeleitet. Dort werden dem Datensatz nach der Vergabe einer Berichtsnummer noch weitere Informationen zu Bedingungen der Analytik und dem Messwert des Gefahrstoffs hinzugefügt. Nach eingehender Prüfung werden die Messwerte und deren messtechnische Angaben für Expositionsbewertungen und statistische Auswertungen verwendet. Die wichtigsten vom Messtechniker auszufüllenden relevanten Randbedingungen einer Messung sind als Pflichtfelder in der Eingabemaske für die Datenbank hinterlegt (insgesamt 67). In Tabelle 2.4 werden die wichtigsten Pflichtfelder nach MGU-Gruppierungen sortiert, angegeben. Manche dieser Parameter sind als Vergleichsvariablen im Datensatz berücksichtigt worden, in diesem Fall sind sie in Tabelle 2.4 mit einem "x" gekennzeichnet worden. Wenn der jeweilige Parameter zusätzlich als sogenannte Schlüsselvariable beim Verknüpfen der Datensätze von A- und E-Staub verwendet worden ist, dann wird diese Variable zusätzlich fett markiert.

Die IFA Expositionsdatenbank MEGA soll dazu beitragen, allgemeine Informationen über Expositions-niveaus in einzelnen Betrieben oder bei bestimmten Tätigkeiten aufzuzeigen oder ihre zeitlichen Verläufe zu dokumentieren. Außerdem können die Messwerte herangezogen werden, wenn beurteilt werden soll, ob Grenzwerte im betrachteten Betrieb eingehalten worden [58].

Bis zum Ende des Jahres 2018 waren in der Datenbank 3,4 Millionen Datensätze hinterlegt worden. Der gesamte Datenbestand setzt sich aus über 891 Gefahrstoffen, 724 Biostoffen aus ca. 72 400 Betrieben, mehr als 850 Branchen und 5 000 Arbeitsbereichen zusammen [71].

Tabelle 2.4:

Einige der wichtigsten Pflichtfelder, die in der IFA Expositionsdatenbank MEGA vom Messtechnischen Dienst hinterlegt werden müssen, und ggf. Verwendung in der vorliegenden Arbeit; fettgedruckt: Schlüsselvariable

MGU-Gruppierungen	Variable	Berücksichtigung in dieser Arbeit (x)
Angaben zur Messerie	IFA Berichtsnummer	x
	Probennummer	
	Probennahmejahr	x
	zuständiger Messtechnischer Dienst	x
	Angabe des autorisierten Mitarbeiters	
Angaben zum Betrieb	Betriebsgröße	
Angaben zum Arbeitsbereich	IBA-Nummer	x
	Freitextliche Bemerkung zum IBA	x
	Teilbetriebsart (Industriebranche)	x
	Arbeitsbereich	x
	Ausgeübter Beruf	

MGU-Gruppierungen	Variable	Berücksichtigung in dieser Arbeit (x)
Angaben zum Arbeitsmittel/ Produktionsanlage	Bezeichnung Arbeitsmittel/Produktionsanlage	
	Erfassung vorhanden (ja/nein)	
	Technische Anbindung der Erfassung	
	Ansauganlage in Betrieb (ja/nein)	
Technische Angaben	Messort	
	Abmessungen des Raumes, in dem die Messung stattfindet	
	Volumen des Raumes	
	Raumluftechnische Anlage vorhanden (ja/nein)	
	Raumluftechnische Anlage in Betrieb (ja/nein)	
Angaben zur Exposition	Expositionsmessung (ja/nein)	x
	Messplan	
	Betriebliche Situation	
	Repräsentativität	x
	Expositionsdauer pro Schicht (h)	
	Messung mit oder ohne Expositionsbezug	x
Angaben zur Probennahme	Probennahmedatum	x
	Anlass der Messung	
	Probennahmearart	x
	Probennahmesystem	
	Prüfmittelkennzeichnung von Pumpe und Volumenprüfgerät	
	Probenträgerart	x
	Probenträgerindividualnummer	
	Probenahmezeit	x
	Probenahmedauer	x
	Volumenstrom	
Analysewunsch		
Angaben zur Analytik	Gefahrstoff	x
	Überführung Aufbereitung	
	Analysensystem Detektion	
	Messwert	x
	Messwertvorzeichen	x
	Verwendungskennung	x

3 Methodik

3.1 Datenbankauswertung zu den relevanten Staubfraktionen

Inhalt dieses Kapitels sind die Methoden und Verfahren, die zur Auswertung der unter Abschnitt 2.4.4 (Datenbank) beschriebenen Daten angewendet werden.

3.1.1 Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren

Zum Zeitpunkt der Datenextraktion im November 2016 waren in der Expositionsdatenbank MEGA 103 825 Datensätze zur einatembaren Staubfraktion und 222 501 Datensätze zur alveolengängigen Staubfraktion aus den Jahren 1961 bis 2016 enthalten. Diese Datensätze werden nach der Entnahme aus MEGA selektiert, um parallel gemessene Paare aus A- und E-Staub zu bilden. Durch die Kombination von beiden Datensätzen ergeben sich insgesamt 424 238 Datenpaare. Das Statistikprogramm SPSS fügt die Datensätze aus A- und E-Staub nach sogenannten Schlüsselvariablen zusammen, die übereinstimmen müssen. Ergeben sich dabei Konflikte, wenn sich z. B. mehrere A-Staub-Messungen zu einer E-Staub-Messung zuordnen lassen, weil die Schlüsselvariablen übereinstimmen, so listet das Programm diese Fälle ebenfalls im Gesamtdatensatz auf (somit erklärt sich die hohe Anzahl an Parallelmessungen des zusammengeführten Datensatzes). Diese Datensätze müssen im weiteren Verlauf per Hand überprüft und sortiert werden.

Datensätze werden von weiteren Auswertungen und Analysen ausgeschlossen, wenn

- keine Messdauer oder -zeit angegeben wird (verbleibende Messwertpaare: $n = 48\ 703$),
- die Dauer der Gefahrstoffmessung weniger als zwei Stunden beträgt (verbleibende Messwertpaare: $n = 37\ 570$),
- die Probennahmeart weder als stationär, noch personengetragen, sondern mobil definiert wird (verbleibende Messwertpaare: $n = 37\ 022$),
- die angewandten Methoden zur Probennahme, Aufarbeitung und Analytik der Staubprobe nicht den Standardverfahren des MGU entsprechen (verbleibende Messwertpaare: $n = 36\ 240$),
- der individuelle betriebliche Arbeitsbereich (IBA) nicht definiert wird (verbleibende Messwertpaare: $n = 34\ 521$),

- die Gefahrstoffkonzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze liegt (verbleibende Messwertpaare: $n = 17\ 934$) und
- die E-Staub-Konzentrationen c_E -Werte größer $100\ \text{mg}/\text{m}^3$ oder die A-Staubkonzentrationen c_A -Werte größer $10\ \text{mg}/\text{m}^3$ zeigen (verbleibende Messwertpaare: $n = 17\ 770$).

Aus den Messungen können nur dann Paare gebildet werden, wenn die Messdauer mit den genauen Uhrzeiten zum Anfang und Ende der Messung angegeben sind. Durch ein übereinstimmendes Probennahmedatum werden Zuordnungsfehler zwar minimiert, durch die Angabe von Messbeginn und Messende jedoch zusätzlich spezifiziert.

Die Anzahl der Messungen, die während einer Arbeitsschicht bei konstanter Exposition durchgeführt werden müssen, ist abhängig von der Probennahmedauer. Nach der europäischen DIN EN 689:1995 ist bei einer Probennahmedauer von zwei Stunden bereits eine Messung zur Expositionsbeurteilung der Arbeitsschicht ausreichend, vorausgesetzt der Probennahmezeitraum ist repräsentativ für die Schicht. Bei geringerer Probennahmedauer sind für den Erhalt einer Aussage mit Schichtbezug mehrere Messungen vorzunehmen [59]. Da an den meisten Arbeitsplätzen nur eine Parallelmessung durchgeführt wird, können somit nur Messungen $\geq 2\ \text{h}$ berücksichtigt werden, da ansonsten Messungen mit und ohne Schichtbezug miteinander vermischt würden.

Es werden nur Messwerte berücksichtigt, die mit validierten Verfahren und Probennahmesystemen ermittelt worden sind. Messsysteme in der Erprobungsphase oder Messungen mit inkonsistenten Messparametern, beispielsweise schwankende Volumenströme während der Messung, werden ausgeschlossen, da dies zu weiteren Verzerrungen der Arbeitsplatzkonzentration und größeren, nicht vorhersagbaren Messwertabweichungen führen kann.

Der individuelle betriebliche Arbeitsbereich wird in der Datenbank mit einer Zahlencodierung und einer Bemerkung angegeben, die für jede Messung vom Messtechniker individuell hinterlegt werden kann. Damit kann z. B. die Position des Probennahmesystems oder die Expositionsquelle näher beschrieben und damit die Gefahr einer falschen Zuordnung von A- und E-Staub-Messungen zusätzlich verringert werden. Die alveolengängige Staubfraktion ist ein Teil des einatembaren Staubs. Aus diesem Grund darf c_A per definitionem nicht größer sein als c_E . Für die Berechnung möglicher Umrechnungsfunktionen werden Konzentrationsbereiche beider Staubfraktionen gewählt, welche repräsentativ für nor-

male Arbeitsbedingungen sein sollen. Aus diesem Grund werden $c_E > 100 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_A > 10 \text{ mg/m}^3$ zur Berechnung der Umrechnungsfunktionen nicht berücksichtigt. Lediglich zur Überprüfung der Sensitivität des in dieser Arbeit beschriebenen Rechenmodells werden diese höheren Messwerte mit einbezogen. Wenn höhere A-Staub-Konzentrationen ermittelt werden, sind häufig fehlerhaft durchgeführte Messungen oder der Messort und die damit verbundenen unterschiedlichen Staubkonzentrationen die Ursache.

Paare aus A- und E-Staub-Messungen werden jeweils gebildet, wenn

- beide Messungen am selben Tag und zur selben Zeit durchgeführt worden sind (Start und Ende der Messungen dürfen sich jeweils maximal um fünf Minuten unterscheiden) (verbleibende Messwertpaare: $n = 15\ 696$),
- beide Messungen mit übereinstimmenden Messparametern (sog. Schlüsselvariablen) in der Datenbank hinterlegt worden sind (dieselbe IFA Berichtsnummer, Teilbetriebsart, Probennahmeart, IBA und Arbeitsbereich) und
- die Konzentration des alveolengängigen Staubs c_A nicht höher als die Konzentration des einatembaren Staubs c_E ist (verbleibende Messwertpaare: $n = 15\ 120$).

Mit der Variablen "Teilbetriebsart" wird der Industriezweig bezeichnet, in dem die Messungen durchgeführt werden, beispielsweise Metallverarbeitung, Bergbau, Zementverarbeitung, Gießereien oder Keramikherstellung.

Unter die Bezeichnung Arbeitsbereich (AB) fallen Tätigkeiten und Prozesse, die in den jeweiligen Industriesektoren durchgeführt werden, beispielsweise Schleifen, Fräsen, Brennschneiden oder Metall-Inertgasschweißen (MIG-Schweißen).

Die Probennahmearten werden in personengetragen und stationär unterteilt. Durch die zusätzliche Kodierung der personengetragenen Systeme für die Tätigkeit *Schweißen* wird außerdem beschrieben, ob sich der Probennahmekopf z. B. unter der Schweißerschutzhaube, im Schweißerschutzschirm oder vor dem Schweißerschutzschild befindet.

3.1.2 Variablenselektion

Die Konzentration des einatembaren Staubs ist nicht nur vom alveolengängigen Staub abhängig. Als weitere Einflussfaktoren werden die Variablen *Tätigkeit*, *Material*, *Probennahmesystem*, *Probennahmejahr* und *Probennahmeart* betrachtet. Die Einflussfaktoren werden darauf

untersucht, ob sie das Verhältnis c_A / c_E ändern. Nur beim Probennahmesystem (PS) wird deskriptiv analysiert, ob diese bevorzugt bei verschiedenen Tätigkeiten oder messtechnischen Diensten zum Einsatz gekommen sind. Probennahmesystem und -art sollten keinen Einfluss auf die Staubexposition haben.

Tätigkeit

Wie im Abschnitt 1.2.1 (Umrechnung Staubfraktionen) dargelegt, hat die Tätigkeit einen Einfluss auf die Staubkonzentrationen, daher wird in dieser Arbeit eine Unterteilung des Gesamtdatensatzes in Tätigkeitsgruppen vorgenommen. Die Gruppierung erfolgt hauptsächlich über die in der Datenbank hinterlegten Arbeitsbereichsbezeichnungen. Ergänzend wird die DIN 8580 herangezogen [72]. Darin werden verschiedene Fertigungsverfahren (z. B. Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten) aufgelistet, die dann wiederum in Untergruppen untergliedert werden (z. B. Druckumformen, Abtragen, Zerlegen, Zerteilen, Kleben oder Löten). Als zusätzliche Überlegung wird auch der Energieeintrag des jeweiligen Arbeitsschritts berücksichtigt (beispielsweise der Einsatz von hochdrehenden Schleifwerkzeugen oder Schweißen).

Material

In direktem Zusammenhang mit den Tätigkeiten steht das verarbeitete Material. Es ist zu erwarten, dass bei der Verwendung unterschiedlicher Materialien bei gleicher oder ähnlicher Tätigkeit unterschiedliche Staubkonzentrationen entstehen können, da sich z. B. die Dichte der Materialien unterscheidet. Der Grenzwert für die A-Fraktion ist in der TRGS 900 unter Annahme einer mittleren Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ für Stäube an Arbeitsplätzen festgelegt worden [73]. Für einzelne Stoffe gelten jedoch A-Staub-Dichten zwischen $0,5 \text{ g/cm}^3$ (Holz) und $11,3 \text{ g/cm}^3$ (Metall) [74]. Außerdem ergeben sich bei unterschiedlichen Materialien auch andere Materialkriterien, beispielsweise Sprödigkeit, Härte oder ihr thermisches Verhalten. Deshalb wird der Gesamtdatensatz ebenfalls in Materialgruppen unterteilt.

Verknüpfung von Tätigkeits- und Materialgruppen

Zur Bestimmung spezifischer Umrechnungsfunktionen werden die Tätigkeitsgruppen nach den Materialgruppen unterteilt und überprüft, ob sich diese statistisch voneinander unterscheiden.

Probennahmesysteme

Alle Probennahmesysteme, die als Standardmessverfahren im IFA genutzt werden, sind nach internationalen Standards validiert. Zum einen sind die Konventionen zur einatembaren und alveolengängigen Fraktion, die in DIN EN 481 [1] aufgeführt werden, Sollvorgaben für Aerosol-

sammler, mit denen der ideale Probennahmewirkungsgrad angegeben werden kann. Darüber hinaus werden beispielsweise in DIN EN 13205-1 [75] Anforderungen an die Sammler für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikeln gestellt. Dazu zählen die erweiterte Messunsicherheit, Variabilität der Prüfmuster und die Stabilität des Luftstroms (bei Geräten mit eingebauten Pumpen). Zusätzlich gibt es Anforderungen an das Verfahren zur Messung, die auch die Messgeräte beinhalten (DIN EN 482 [76]). Hierzu zählen beispielsweise ein angemessener Messbereich und Selektivität für den zu messenden Stoff. Eine der Voraussetzungen zur Aufnahme der Messwerte in die Expositionsdatenbank MEGA des IFA ist, dass diese mit validierten Messsystemen ermittelt worden sind, die den oben genannten Anforderungen entsprechen. Obwohl sich die Probennahmebedingungen, insbesondere der Volumenstrom, bei den verschiedenen Probennahmesystemen (Abschnitt 2.4.2 (Probennahmesysteme)) stark unterscheiden, zeigen sie trotzdem ein vergleichbares Abscheideverhalten. Aus diesen Gründen können messsystembedingte Schwankungen vernachlässigt werden.

Um die Probennahmesysteme als Einflussfaktor der Staubkonzentrationen auszuschließen, wird untersucht, ob die Geräte bei bestimmten Tätigkeiten eingesetzt oder nur von speziellen Messtechnischen Diensten (MTD) zur Messung verwendet werden. Dazu werden Streudiagramme erstellt, die den Einsatz der Systeme in Abhängigkeit der Tätigkeiten bzw. den MTD veranschaulichen sollen.

Probennahmejahr

Im Zuge der sukzessiven Grenzwertabsenkungen für A- und E-Staub sowie dem technischen Fortschritt wird überprüft, ob das Probennahmejahr einen Einfluss auf die Staubexposition hat. Darüber hinaus wird untersucht, ob die Einführung eines neuen Probennahmesystems Einfluss auf die Konzentrationsverhältnisse gehabt hat.

Probennahmeart

Die Probennahmeart sollte keinen Einfluss auf die Staubexposition haben. Die stationäre Probennahme ist darüber hinaus an bestimmte Arbeitsorganisationen gebunden. Beispielsweise werden stationäre Systeme dann eingesetzt, wenn mehrere Messungen verschiedener Gefahrstoffe durchgeführt werden sollen, aber nur zwei Pumpen parallel an der beschäftigten Person angebracht werden können.

Außerdem werden häufiger Grundbelastungen stationär gemessen. Dadurch, dass mit den stationären Messgeräten ein höherer Volumenstrom angelegt werden kann, können auch niedrige Bestimmungsgrenzen erreicht werden [77]. Aus diesem Grund werden stationäre Messungen häufiger an Arbeitsplätzen durchgeführt, an denen geringe Gefahrstoffkonzentrationen erwartet werden.

3.1.3 Statistische Verfahren

Alle Auswertungen und statistischen Tests zur Datenbankauswertung werden mithilfe der Software IBM SPSS statistics, Version 23 (IBM Corp.) durchgeführt. Für alle in dieser Arbeit aufgeführten statistischen Tests wird das Signifikanzniveau bei $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Gruppenbildung der Messwertpaare

Die Gruppenbildung der Messwertpaare erfolgt nach einem bestimmten Schema, das in Abbildung 3.1 dargestellt wird. Aus dem Gesamtdatensatz werden wie in Abschnitt 3.1.2 (Variablenselektion) beschrieben, Zwischengruppen aus *Tätigkeiten* und *Material* gebildet. Es wird überprüft, ob verwandte Materialuntergruppen zusammengefügt und Tätigkeitsgruppen nach technischen Spezifikationen weiter unterteilt werden können.

Grundbegriffe der Statistik

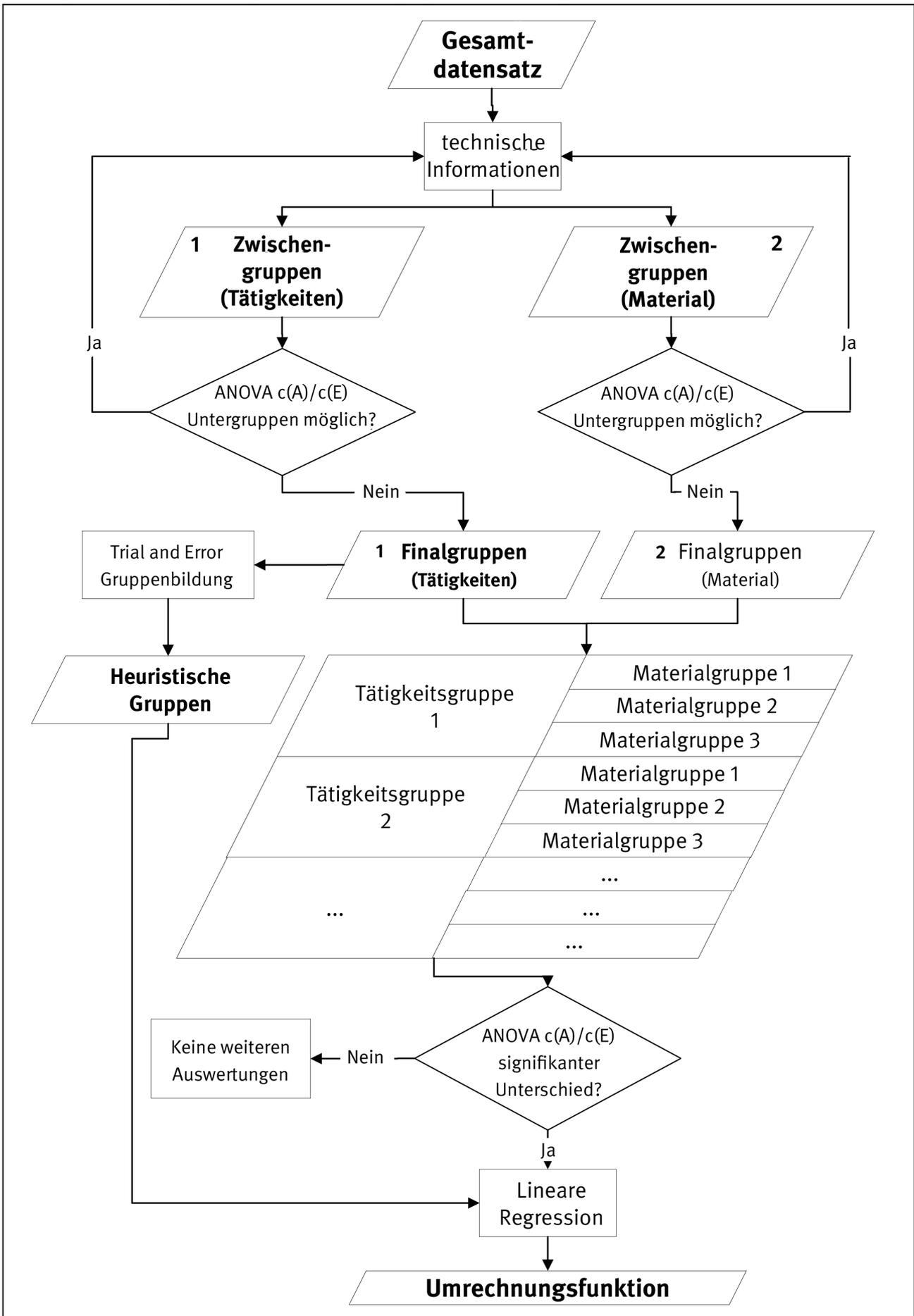
Durch statistische Tests wird die Lage interessierender Parameter geschätzt. Der wahre Wert des Parameters kann dabei nie genau bestimmt, im Gegenzug aber eingegrenzt werden. Man versucht ein Intervall zu bestimmen, in dem der wahre Wert des Parameters zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit wiederzufinden ist (Konfidenzintervall, auch Erwartungsbereich genannt).

Bei statistischen Tests werden jeweils zwei spezielle Test-Hypothesen geprüft:

- Die **Nullhypothese** (H_0): Zwei Grundgesamtheiten stimmen bezüglich eines Parameters überein. Unterschiede ergeben sich nur zufällig [78].
- Die **Alternativhypothese** (H_1): Zwei Grundgesamtheiten unterscheiden sich bezüglich eines Parameters wesentlich (H_1 widerspricht H_0) [78].

Wird durch einen statistischen Test ein Unterschied der Grundgesamtheiten festgestellt, wird die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese angenommen [78; 79].

Abbildung 3.1:
 Flussdiagramm zur Gruppenbildung unter Berücksichtigung der Variablen *Tätigkeit* und *Material*



Mit der sogenannten Irrtumswahrscheinlichkeit α (auch Signifikanzniveau) wird die zuvor im Hypothesentest festgelegte, maximale Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der H_0 bei einem statistischen Test abgelehnt wird, obwohl H_0 wahr ist (Fehler 1. Art). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - \alpha$ die Entscheidung die Nullhypothese zu akzeptieren, richtig ist [78].

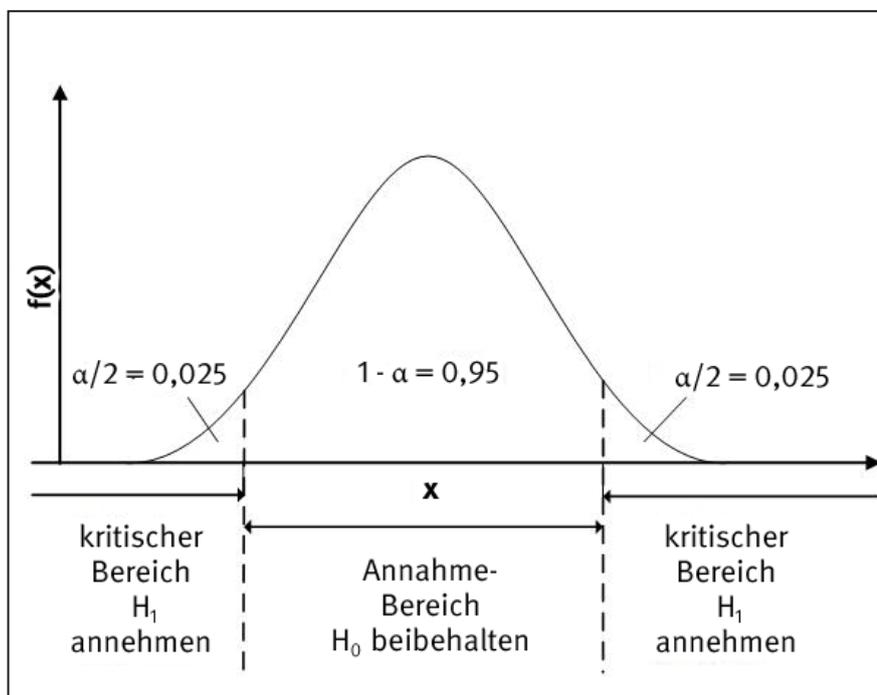
Die Irrtumswahrscheinlichkeit wird üblicherweise bei $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,05$ oder $\alpha = 0,01$ gewählt [78; 79]. In dieser Arbeit ist $\alpha = 0,05$ festgelegt worden, d. h. dass sich aus den Daten ein Konfidenzintervall generieren lässt, das mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % den wahren Wert

enthält. Ebenso wird damit ausgesagt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Annahme von H_0 richtig ist, bei 95 % liegt.

Abbildung 3.2 zeigt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Diese gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein bestimmtes Stichprobenereignis einer kontinuierlichen Variablen (z. B. Konzentrationen) zustande kommt. Dabei wird auf der x-Achse das Ergebnis dargestellt und auf der y-Achse die Wahrscheinlichkeitsdichte. Das Konfidenzintervall wird beschrieben durch den Bereich $1 - \alpha$, während α den Ablehnungsbereich von H_0 markiert.

Abbildung 3.2:

Beispiel einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, Konfidenzintervall im Bereich von $1 - \alpha$, bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$; dabei $x = \text{Ereignis}$ und $f(x) = \text{Wahrscheinlichkeitsdichte}$ für das Eintreten des Ereignisses [80]



Ob ein Testergebnis signifikant ist, wird durch den Vergleich des α -Wertes mit dem p -Wert (Überschreitungswahrscheinlichkeit) ermittelt. Liegt der ermittelte p -Wert in der Nähe von 1, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass Abweichungen von Stichproben der Grundgesamtheiten zufällig zustande gekommen sind, hoch. Bei kleinen p -Werten ist es möglich, dass die Stichprobe aus einer Grundgesamtheit mit einem anderen Mittelwert stammt [78; 79]. Bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ werden p -Werte $< 0,05$ als statistisch signifikant und $p < 0,01$ als hochsignifikant bezeichnet [80].

Bei der linearen Regression geht man von einer linearen Abhängigkeit zweier Variablen voneinander aus. Dabei lässt sich die Beziehung der Variablen beschreiben durch [80]:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 * x_i \quad (3.1)$$

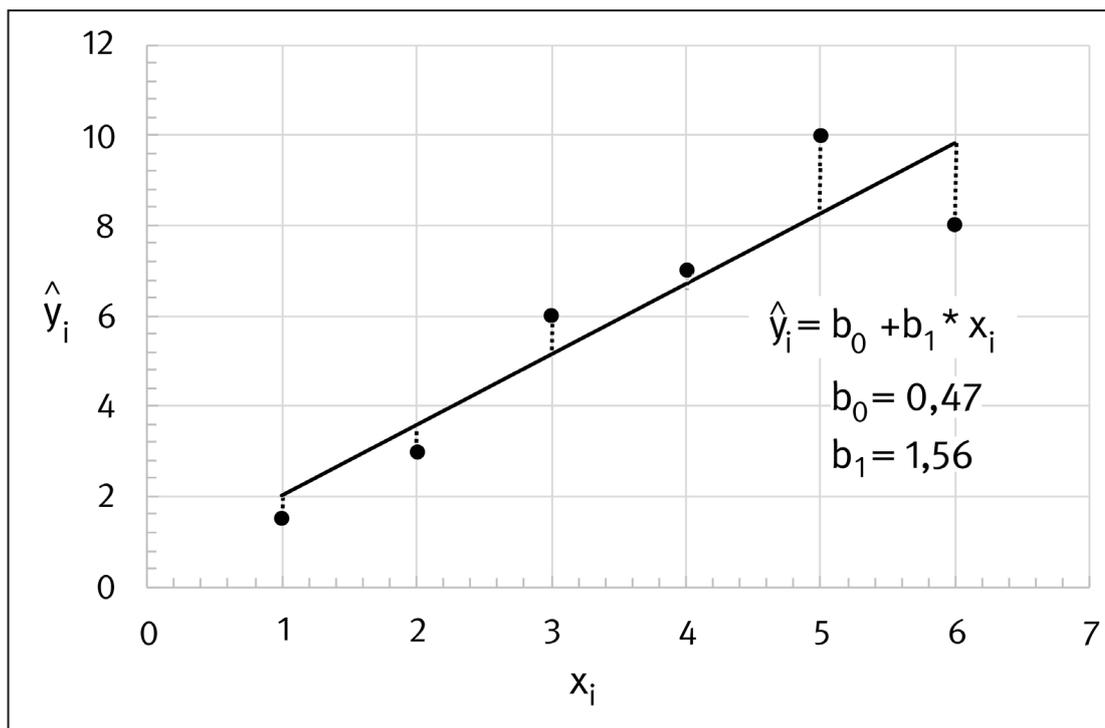
Dabei sind b_0 und b_1 jeweils Regressionskoeffizienten. \hat{y}_i ist der vorhersagbare Wert für \hat{y}_i bei gegebenem x_i . \hat{y}_i wird auch als Schätzwert oder Vorhersagewert bezeichnet. Wenn sich Vorhersage- (\hat{y}_i) und Beobachtungswert (y_i) unterscheiden, kann man den Residualwert e_i berechnen [80]:

$$e_i = (y_i - \hat{y}_i) \quad (3.2)$$

In Abbildung 3.3 wird eine lineare Trendlinie gezeigt, die sich aus den Vorhersagewerten bei gegebenen x_i zusammensetzt, sowie die Beobachtungswerte. Die gestrichelten Linien verdeutlichen die Residualwerte. Addiert man alle e_i , so ergibt die Summe 0.

Abbildung 3.3:

Darstellung einer Beispieltrendlinie mit den Beobachtungswerten y_i , den gegebenen Werten für x_i und den Residuen (gestrichelte Linien)



Test auf Normalverteilung

Da gemessene Konzentrationen an Arbeitsplätzen nicht negativ werden können, sind Verteilungen im Zusammenhang mit Gefahrstoffen bis null beschränkt. Das führt zu linkssteilen bzw. rechtsschiefen Verteilungen, die lognormalverteilt beschrieben werden [36; 81; 82]. In jeder gebildeten Gruppe (Zwischengruppen, Untergruppen und Finalgruppen, Abbildung 3.1) wird die Verteilung der Messwerte beider Staubfraktionen mit dem robusten Kolmogorov-Smirnov-Test und der Signifikanzkorrektur nach Lilliefors überprüft [78; 80]. Bei kleineren Gruppen ($n \leq 100$) findet der Shapiro-Wilk-Test Anwendung, da mit ihm eine höhere Trennschärfe, insbesondere bei kleineren Gruppen, erreicht werden kann [83]. Für diese Tests lauten die Null- und die Alternativ-hypothese:

H_0 : Die Messwerte sind (log-)normalverteilt.

H_1 : Die Messwerte sind nicht (log-)normalverteilt.

Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA)

Vor der Durchführung der Varianzanalyse wird überprüft, ob zwischen den betrachteten Gruppen die Varianzen homogen verteilt sind (Homoskedastizität). Zum Nachweis wird der Levene-Test durchgeführt und beurteilt [80; 84]. Der Levene-Test ist eine Variante des F-Tests und untersucht die Abweichung der einzelnen Fälle vom arithmetischen Mittel. Dabei wird auf folgende Annahmen getestet:

H_0 : Die Varianz ist in allen Gruppen gleich.

H_1 : Mindestens ein Gruppenpaar besitzt ungleiche Varianzen.

Beim Bilden der Zwischen- und Untergruppen von *Tätigkeiten* und *Material*, sowie nach dem Verbinden der Materialuntergruppen und dem Verknüpfen beider Variablen *Tätigkeit* und *Material*, wird mittels Varianzanalyse überprüft, ob sich die Mittelwerte bzw. Mediane von c_A / c_E der Gruppen voneinander unterscheiden. Dafür findet bei (log-)normalverteilten Messwerten und Homoskedastizität innerhalb der Gruppen die ANOVA Anwendung [78; 80]. Dabei wird auf folgende Hypothesen getestet:

H_0 : Die Mittelwerte der betrachteten Variablen sind über alle betrachteten Gruppen hinweg gleich.

H_1 : Die Mittelwerte der betrachteten Variablen von mindestens zwei Gruppen unterscheiden sich.

Anderenfalls wird der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test durchgeführt [78; 80]:

H_0 : Die Mediane der betrachteten Variablen sind über die Gruppen hinweg identisch.

H_1 : Die Mediane der betrachteten Variablen von mindestens zwei Gruppen unterscheiden sich.

Um Untergruppen (z. B. bei *Material*) zusammenschließen zu können, wird zusätzlich zu ANOVA bzw. Kruskal-Wallis der Games-Howell-post-hoc-Test durchgeführt. Mit diesem Test werden paarweise Vergleiche von Gruppen durchgeführt und es können statistisch nicht unterscheidbare (nicht signifikante) Gruppen identifiziert werden, auch wenn die Varianzen ungleich sind und die abhängige Variable nicht normalverteilt ist [78; 80]. Der Test berücksichtigt darüber hinaus die veränderte Wahrscheinlichkeit, einen signifikanten Unterschied zu ermitteln und testet mit gleichem Signifikanzniveau (5 %) die Differenz der Mittelwerte zweier Gruppen bei höherer Testgröße [80]. So wird eine Alphafehler-Kumulierung vermieden.

Lineare Regression

Funktionaler Zusammenhang

In Übereinstimmung mit anderen Studien (z. B. [25; 85]) wird folgender Zusammenhang zwischen c_A und c_E untersucht:

$$\ln\left(\frac{c_A}{\text{mg m}^{-3}}\right) = k \cdot \ln\left(\frac{c_E}{\text{mg m}^{-3}}\right) + C_0 \quad (3.3)$$

Dabei geben k und C_0 jeweils Steigung bzw. Achsenabschnitt der Funktion an, die mit einer linearen Regressionsanalyse für jede Gruppe ermittelt werden kann.

Der funktionale Zusammenhang in Gl. (3.3) lässt sich besser interpretieren, wenn man die folgende Umformung vornimmt:

$$\left(\frac{c_A}{\text{mg m}^{-3}}\right) = \left(\frac{c_E}{\text{mg m}^{-3}}\right)^k \cdot e^{C_0} \quad (3.4)$$

Aus dieser Gleichung wird ersichtlich, dass wenn c_E gegen null tendiert, c_A ebenfalls gegen null tendiert. Dies ist eine notwendige Voraussetzung da $c_A \leq c_E$ gilt.

Außerdem ist es möglich, dass zwei Grenzfälle den Zusammenhang zwischen c_A und c_E beschreiben. Einerseits ein rein linearer Zusammenhang; dann wäre $C_0 \neq 0$ und $k = 1$ (oder zumindest 1 im Konfidenzbereich des Parameters k).

Im „worst case“ könnte $c_A = c_E$ sein ($C_0 = 0$ und $k = 1$).

Es wäre möglich, die Gl. (3.3) und (3.4) noch um weitere lineare Terme für andere unabhängige Variablen, beispielsweise *Tätigkeit* oder *Material* zu erweitern. Jedoch ist eine multiple lineare Regressionsanalyse nicht möglich, da diese voneinander unabhängige Variablen erfordert [80].

Voraussetzungen

Jede gebildete Gruppe wird auf die wichtigsten Voraussetzungen zur Durchführung einer linearen Regressionsanalyse hin überprüft. In Tabelle 3.1 werden die Voraussetzungen sowie die Maßnahmen zur Kontrolle beschrieben.

Tabelle 3.1:

Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regression [86] sowie Maßnahmen zur Überprüfung

Nr.	Voraussetzung	Maßnahme
1	Abhängige und unabhängige (Prädiktor) Variable müssen intervallskaliert sein.	Vergleich der Skala
2	Ein linearer Zusammenhang sollte zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable vorliegen.	Rechnerisch: Testen der Regressionskoeffizienten (der Steigung) mittels t-Test. Zusätzlich: Betrachtung der Gl. (3.3 und 3.4) und deren Konfidenzintervall für k (Gl. (3.4), Beschreibung)
3	Homoskedastizität sollte vorliegen.	Grafisch: Standardisiertes Residuenstreudiagramm wird erstellt.
4	Die Residuen müssen annähernd normalverteilt sein.	Grafisch: Histogramm der Residuen mit Normalverteilungskurve. Rechnerisch: Kolmogorov-Smirnov-Test oder Shapiro-Wilk-Test (für $n \leq 100$).
5	Die Residuen müssen unabhängig voneinander sein (z. B. keine Autokorrelation vorhanden).	Rechnerisch: Durbin-Watson Test
6	Es sollten keine Hebelwerte im Datensatz vorliegen.	Rechnerisch: Es wird die Cook'sche Distanz berechnet. Grafisch: Die Streudiagramme der Datensätze werden auf einzelne Messwertpaare untersucht, die außerhalb der normalen Messwertstreuung liegen.

Variablen sind intervallskaliert, wenn die Abstände zwischen den Ausprägungen eines Merkmals genau beschrieben werden können, wie beispielsweise bei Konzentrationen, bei denen die Werte auf einige Nachkommastellen genau angegeben werden können [79].

Zum Nachweis der Homoskedastizität (Varianzhomogenität) werden in jeder Gruppe Residuen-Streudiagramme erstellt und beurteilt [87]. Die Diagramme sollten kein Verteilungsmuster, wie z. B. eine Trichterform aufweisen, damit Homoskedastizität vorliegt. Keine Muster im Diagramm sind zudem ein Hinweis auf Normalverteilung der Residuen [80].

Wenn die Bedingungen 3 bis 5 zur Durchführung zutreffen, dann ist der standardisierte Stichproben-Regressionskoeffizient t -verteilt. Um die Annahme zu überprüfen, ob bei betrachteten Variablen grundsätzlich ein (linearer) Regressionszusammenhang angenommen werden darf, wird ein t -Test mit folgenden Hypothesen durchgeführt [80]:

H_0 : Die Steigung der Variablen Grundgesamtheit ist 0 (kein linearer Zusammenhang).

H_1 : Die Steigung der Variablen Grundgesamtheit ist $\neq 0$.

Erhält man bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % signifikante Ergebnisse, so ist die Voraussetzung der Linearität gegeben [80].

Mithilfe des Durbin-Watson Tests wird überprüft, ob eine Autokorrelation 1. Ordnung der Residualwerte vorliegt. Das heißt, ob der Residualwert e_i positiv oder negativ vom vorhergehenden Residualwert e_{i-1} abhängt [80]. Rechnerisch wird der Zusammenhang folgendermaßen beschrieben [80]:

$$e_i = \rho \cdot e_{i-1} + \xi_i \quad (3.5)$$

Dabei sind ρ eine Konstante und ξ_i eine Zufallsvariable. Der Test lautet auf folgende Hypothesen [80]:

H_0 : $\rho = 0$

H_1 : $\rho \neq 0$

Aus den Residuen wird die sogenannte Durbin-Watson Prüfgröße d berechnet. Diese Größe kann im Bereich von 0 bis 4 schwanken. Wenn H_0 angenommen wird, nimmt d einen Wert ≈ 2 an. Zusätzlich zu den Ablehnungsbereichen gibt es Indifferenzbereiche, in denen keine klare Entscheidung über Autokorrelation getroffen werden kann [80].

Außerdem wird bewertet, ob die mittels Regressionsanalyse bestimmten Umrechnungsfunktionen durch einzelne

Punkte („leverage points“) besonders stark beeinflusst werden. Dazu werden die Cook'sche Distanz der einzelnen Punkte zur Regressionsfunktion berechnet und die Effekthöhe bestimmt, wenn ein Punkt ausgelassen werden würde. Große Distanzwerte bedeuten einen hohen Einfluss auf die resultierende Regressionsgleichung [80]. Zur Interpretation der Cook'schen Distanz gibt es mehrere Möglichkeiten. In dieser Arbeit wird überprüft, ob in den Datensätzen Werte mit Distanzen >1 vorliegen. Dies gilt allgemein als Indikator für einen großen Effekt auf die Ergebnisse [88; 89]. Fallen in einem Datensatz Messwertpaare mit einem deutlich höheren Distanzmaß auf als es die Grundgesamtheit zeigt, werden die Messwertpaare zusätzlich grafisch beurteilt. In einer vergleichenden Regressionsanalyse wird abschließend festgestellt, wie viel Einfluss die betreffenden Punkte wirklich auf die Regressionsfunktion haben, indem diese Hebelwerte bei der Analyse nicht berücksichtigt werden.

Ergebnisdarstellung

Die Parameter k und C_o werden jeweils mit ihren Standardabweichungen angegeben. Zur Berechnung von c_A wird darüber hinaus die Standardabweichung der angepassten Regressionsfunktion $s_{Fit}(\ln(c_A^*))$ bestimmt. Damit können die Konfidenzintervalle der Regressionsfunktionen an einem bestimmten $s_{Fit}(\ln(c_E^*))$ angegeben werden [90]. Die kleinsten Werte für $s_{Fit}(\ln(c_A^*))$ werden um den Mittelwert von $s_{Fit}(\ln(c_E^*))$ erreicht und die größten Werte für $s_{Fit}(\ln(c_A^*))$ an den Extremstellen von $s_{Fit}(\ln(c_E^*))$. In den Ergebnissen wird dieser Wertebereich für jede Regressionsanalyse mit angegeben.

Die Güte des Modells der linearen Regression wird in jeder Gruppe mit den Parametern R (Korrelationskoeffizient) und R^2 (Bestimmtheitsmaß) angegeben. Dabei kann R^2 Werte zwischen 0 (keine Erklärungskraft) und 1 (Modell kann Werte perfekt vorhersagen) annehmen [91]. Das Bestimmtheitsmaß wird darüber hinaus durch die Anzahl der miteinbezogenen unabhängigen Variablen beeinflusst. Je mehr Variablen hinzugefügt werden, desto mehr nähert sich R^2 dem Wert 1, unabhängig vom Erklärungswert der hinzugefügten Variablen [80]. Aus diesem Grund wird für diese Arbeit das nach den unabhängigen Variablen korrigierte R^2 , das sogenannte $adj.R^2$, nach folgender Formel berechnet [80] und angegeben.

$$adj.R^2 = R^2 - \frac{o}{(n - o - 1)} \cdot (1 - R^2) \quad (3.6)$$

Wobei o der Anzahl der Variablen und n der Anzahl der Wertepaare in der jeweiligen Gruppe entspricht. Da in dieser Arbeit keine multiple lineare Regression durchgeführt werden kann, wird in jeder Analyse nur eine unabhängige Variable berücksichtigt und das führt dazu, dass $adj.R^2 \approx R^2$ ist.

Zusätzlich zu den systematisch bestimmten Finalgruppen (Abbildung 3.1) werden sehr spezifische Gruppen aus einzelnen, verwandten Arbeitsbereichen gebildet, die ähnliche Regressionskoeffizienten und höhere Werte für $adj.R^2$ und R als die Finalgruppen zeigen. Diese Gruppen werden mittels Trial-and-Error bestimmt und unter dem Begriff „Heuristische Gruppen“ zusammengefasst.

3.2 Datenbankauswertung zu den metallischen Inhaltsstoffen

Neben den Konzentrationen von A- und E-Staub sollen auch die metallischen Inhaltsstoffe betrachtet werden. Im Nachfolgenden werden die Selektion der Datensätze und Paarbildung der Inhaltsstoffe beschrieben sowie statistische Tests zur Auswertung dargelegt.

3.2.1 Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren

Im ersten Schritt werden relevante metallische Inhaltsstoffe ausgewählt. Diese umfassen hauptsächlich die kanzerogenen Elemente, die sich in den Stäuben feststellen lassen und in der Datenbank mit ihren ermittelten Konzentrationen hinterlegt werden. Bei der Selektion der Datensätze gelten die gleichen Voraussetzungen, wie bereits in Abschnitt 3.1.1 (Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren) für die Auswertungen der Staubfraktionen beschrieben.

Die Paarbildung der parallel gemessenen Inhaltsstoffe erfolgt in zwei Schritten. Zunächst muss sichergestellt werden, dass das jeweilige metallische Element in der betrachteten Staubfraktion gemessen worden ist. Dazu werden zunächst Parallelmessungspaare aus den A-Staub- und den Inhaltsstoffmessungen, nach den ebenfalls in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Kriterien, gebildet. Der gleiche Prozess wird für den E-Staub wiederholt. Dann werden die Paare aus A-Staub-Konzentrationen und Inhaltsstoffen im A-Staub mit den Paaren aus E-Staub-Konzentrationen und Inhaltsstoffen im E-Staub zusammengeführt und verknüpft.

$$\frac{m}{mg} \left(0 \leq \frac{D}{\mu m} \leq \frac{D_{ae}}{\mu m} \right) = \frac{M}{mg} P_3 \left(\frac{D_{ae}}{\mu m} \right) = \frac{M}{mg} \int_0^{\frac{D_{ae}}{\mu m}} q_3 \left(\frac{D}{\mu m} \right) d \frac{D}{\mu m} \quad (3.7)$$

Mit

$$q_3 \left(\frac{D}{\mu m} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \ln(GSD) * \left(\frac{D}{\mu m} \right)} * \exp \left(- \frac{(\ln(\frac{D}{\mu m}) - (\frac{\mu}{\mu m}))^2}{2 * (\ln(GSD))^2} \right) \quad (3.8)$$

Die so erzeugten Paare werden zur weiteren Auswertung verwendet, sofern $n \geq 30$. Je höher die Anzahl der Messpaare, desto größer wird die Teststärke, d. h. desto wahrscheinlicher ist es, einen vorhandenen Effekt wirklich aufzudecken [92].

Die Datensätze der jeweiligen metallischen Inhaltsstoffe werden anschließend, analog zu Abbildung 3.1, nach *Tätigkeiten* und *Material* unterteilt, sofern eine ausreichend große Paaranzahl vorliegt.

3.2.2 Statistische Verfahren

Die statistischen Auswertungen erfolgen mit den gleichen Verfahren, die bereits für A- und E-Staub in Abschnitt 3.1.3 beschrieben wurden.

3.3 Partikelgrößenverteilungen der Umrechnungsfunktionen

Nachdem die Umrechnungsfunktionen für einzelne Gruppen festgelegt worden sind, soll bestimmt werden, welche Partikelgrößenverteilungen bei den einzelnen Umrechnungsfunktionen möglich sind.

3.3.1 Allgemeine Vorbemerkung

Partikelgrößenverteilungen sind der Form nach Verteilungsfunktionen. Für Partikeln, Aerosole und Pulver wird angenommen, dass ihre Partikelgrößenverteilung einer Lognormalverteilung entspricht [93 bis 96]. Die Zufallsvariable, die mit der Lognormalverteilung beschrieben wird, ist der aerodynamische Durchmesser D_{ae} . Die Partikelgrößenverteilung ordnet jedem D_{ae} eine Zahl $0 \leq P_3(D) \leq 1$ zu. Diese ist der Anteil, den Partikeln mit einem Durchmesser D zwischen null und D_{ae} an einer Messgröße der Grundgesamtheit haben. In dieser Arbeit wird die Massenkonzentration betrachtet, aus diesem Grund beschreibt $P_3(D_{ae})$ den Anteil an der Gesamtmasse M . Somit ergibt sich für die Masse von Partikeln mit $D < D_{ae}$:

Da $P_3(D_{ae})$ der Form nach der kumulierten Verteilungsfunktion einer Lognormalverteilung entspricht, ist $q_3(D)$ der Form nach die Wahrscheinlichkeitsdichte einer Lognormalverteilung mit dem Erwartungswert μ und der Standardabweichung σ .

Bei der *GSD* handelt es sich um die geometrische Standardabweichung, die folgendermaßen von σ abhängt [93]:

$$\sigma = \ln(GSD) \quad (3.9)$$

In dieser Arbeit wird angenommen, dass μ und *GSD* den Werten entsprechen, die in DIN EN 13205-2 zum Testen der Leistungsfähigkeit von Partikelsammlern angegeben sind: μ ändert sich ganzzahlig zwischen 1 und 30 μm und *GSD* zwischen 1,75 und 4,00 (mit einer Schrittweite von 0,25) [36].

Aus den Kombinationen von μ und *GSD* ergeben sich 300 verschiedene Partikelgrößenverteilungen für die Gesamtheit der Schwebstoffe (G). In DIN EN 13205-2 werden zusätzlich Einschränkungen von μ und *GSD* für die A- und E-Fraktion angegeben, sodass 216 der möglichen Partikel-

$$E_{E>A} = \left[1 - F_A \left(\frac{D}{\mu m} \right) \right] = \left[1 - 0,5 \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln \left(\frac{D}{\mu m} \right) - \ln(4,25)}{\sqrt{2} \ln(1,5)} \right) \right) \right] \quad (3.11)$$

Wobei F_A eine Wahrscheinlichkeitsfunktion darstellt, die einer Lognormalverteilung gehorcht und *erf* die Fehlerfunktion ist. Während in der DIN EN 481 prozentuale Anteile angegeben sind, liegen die Funktionswerte der Gl. (3.10) und (3.11) zwischen null und eins. Beide Trennfunktionen sind keine Stufenfunktionen, sondern zeigen einen S-förmigen Kurvenverlauf (Abbildung 3.4). Daher werden die Partikeln mit einem bestimmten Durchmesser D nicht vollständig einer Fraktion zugeteilt, sondern lediglich zu einem gewissen Anteil, der über $E_{G>E}$ und $E_{E>A}$ berechnet wird. Abbildung 3.5 zeigt eine schematische Darstellung der Trennfunktionen bei lognormalverteilten Partikelgrößen. Alle Berechnungen und grafische Darstellungen zu den Partikelgrößenverteilungen werden mit der Software MATLAB, Version R2017a (MathWorks, Inc.) durchgeführt. Da die Fehlerfunktion in Gl. (3.11) nicht analytisch darstell-

bar ist, gibt es zur Berechnung zwei Möglichkeiten: Man kann entweder die numerische Umsetzung in der Software MATLAB nutzen oder die in DIN EN 481, Anhang B vorgeschlagene Potenzreihenentwicklung [1]. Testrechnungen haben ergeben, dass sich die so berechneten Verhältnisse von c_A um nicht c_E mehr als 10^{-5} unterscheiden, sodass im weiteren Verlauf nur noch die Berechnung mittels MATLAB gewählt worden ist.

größenverteilungen übrig bleiben, die untersucht werden müssen. In DIN EN 13205-2 wird e^μ als *MMAD*, dem massebezogenen medianen aerodynamischen Durchmesser, angegeben.

Wenn man annimmt, dass die gesamten Schwebstoffe in der Luft mit einer einzigen Partikelgrößenverteilung $q_3(D)$ beschrieben werden können (Gl. (3.8)), so ist es möglich, mithilfe der Konventionen, die in DIN EN 481 [1] angegeben werden, zu berechnen, welcher Massenanteil von G auf den einatembaren Staub ($G > E$) und welcher Massenanteil des E-Staubes auf den A-Staub entfällt ($E > A$).

Dazu werden (Trenn-)funktionen aufgestellt, mit denen festgelegt wird, welcher Anteil von Partikeln mit dem Durchmesser D auf die jeweils kleinere Fraktion entfällt. So lautet die Trennfunktion von der Gesamtheit der Schwebstoffe zum E-Staub [1]:

$$E_{G>E} = 0,5 \left(1 + \exp \left(-0,06 \left(\frac{D}{\mu m} \right) \right) \right) \quad (3.10)$$

Für die Funktion vom einatembaren zum alveolengängigen Staub gilt:

3.3.2 Berechnung des Konzentrationsverhältnisses aus Partikelgrößenverteilungen

Aus jeder der 216 möglichen Partikelgrößenverteilungen $q^3(D)$ ([36]) von G werden mit Hilfe der Trennfunktionen 3.10 und 3.11 ein Verhältnis c_A / c_E berechnet:

$$\frac{\frac{c_A}{\text{mg m}^{-3}}}{\frac{c_E}{\text{mg m}^{-3}}} = \frac{\frac{M_A}{\text{mg}}}{\frac{M_E}{\text{mg}}} = \frac{\frac{M}{\text{mg}} \int_0^\infty q_{3,G} \left(\frac{D}{\mu m} \right) E_{G>E} E_{E>A} d \left(\frac{D}{\mu m} \right)}{\frac{M}{\text{mg}} \int_0^\infty q_{3,G} \left(\frac{D}{\mu m} \right) E_{G>E} d \left(\frac{D}{\mu m} \right)} = \frac{\int_0^\infty q_{3,G} \left(\frac{D}{\mu m} \right) E_{G>E} E_{E>A} d \left(\frac{D}{\mu m} \right)}{\int_0^\infty q_{3,G} \left(\frac{D}{\mu m} \right) E_{G>E} d \left(\frac{D}{\mu m} \right)} \quad (3.12)$$

Da sich die Konzentrationen auf dasselbe Volumen beziehen, ergibt sich das Verhältnis der Konzentrationen aus dem Verhältnis der Massen. Die Masse jeder einzelnen Fraktion (M_A, M_E (Gl. 3.7)) ergibt sich aus dem Integral

über alle Durchmesser, wobei sich der Integrand aus dem Produkt von Trennfunktion und Partikelgrößenverteilung ergibt (Abbildung 3.5).

Abbildung 3.4:

Die Konventionen der drei Staubfraktionen in Prozent der gesamten luftgetragenen Partikel nach DIN EN 481 [1]

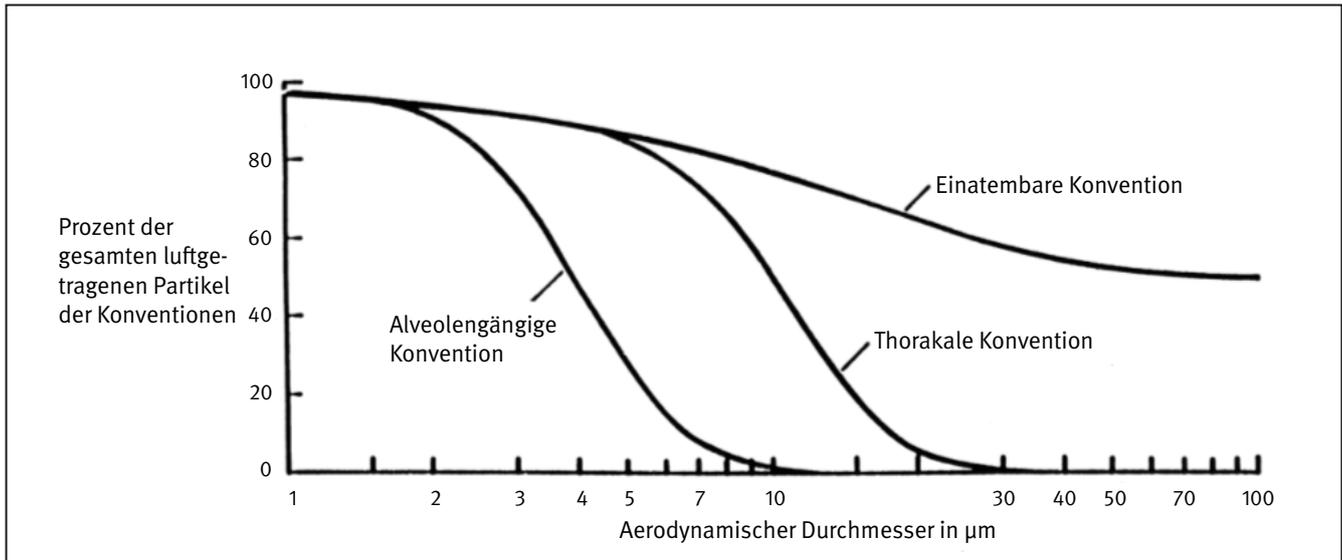
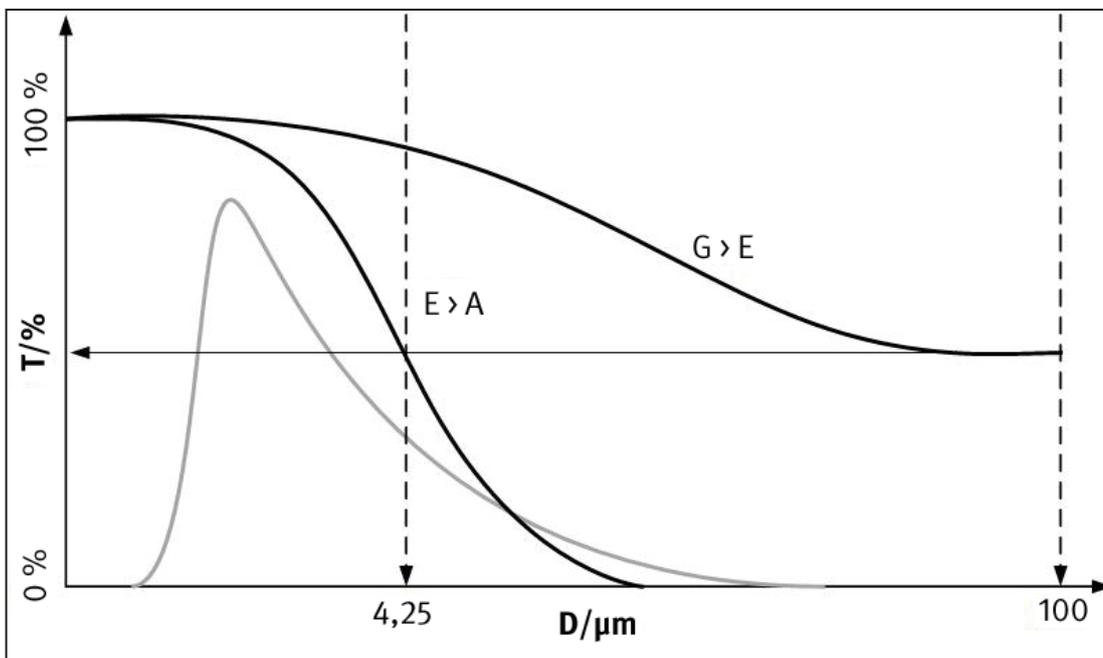


Abbildung 3.5:

Schematische Darstellung der Trennfunktionen $G > E$ und $E > A$ bei lognormalverteilten Partikelgrößen

An dieser Stelle wird auch der Unterschied zwischen dem rein linearen Modell (Gl. 3.3) und der Potenzfunktion (Gl. 3.4) in Abschnitt 3.1.3 (Funktionaler Zusammenhang) deutlich. Falls die Gesamtheit aller Schwebstoffe nur mit einer einzigen Partikelgrößenverteilung beschrieben werden kann, muss das Verhältnis aus c_A / c_E immer gleich sein und der Steigung des linearen Modells entsprechen. Wird im Gegensatz dazu eine Potenzfunktion beobachtet, so lässt sich das nur dadurch erklären, dass sich die Partikelgrößenverteilungen, d. h. deren Parameter μ und GSD , ändern.

Mit den Potenzfunktionen, wie sie sich aus der Regressionsanalyse für die einzelnen Gruppen ergeben, lässt sich aus der kleinsten und größten gemessenen Konzentration von einatembaren Staub ein Bereich von beobachteten Konzentrationsverhältnissen für jede Gruppe angeben. Mithilfe von Gl. (3.12) werden aus den 216 möglichen Partikelgrößenverteilungen (nach EN 13205-2) diejenigen Verteilungen ausgewählt, die mit diesem Bereich übereinstimmen.

4 Ergebnisse

4.1 Datenbankauswertung zu den relevanten Staubfraktionen

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Auswertungen und statistischen Tests um die Messwertpaare aus A- und E-Staub dargestellt.

4.1.1 Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren

Durch das in Abschnitt 3.1.1 beschriebene Selektionskriterium $c_A \leq c_E$ werden 592 Messwertpaare ausgeschlossen. Durch die Festlegung $c_A \leq 10 \text{ mg/m}^3$; $c_E \leq 100 \text{ mg/m}^3$ werden weitere 119 Messwertpaare ausgeschlossen.

Nach Berücksichtigung aller Einschränkungen und dem Zusammenführen der Datensätze kann ein Gesamtdatensatz mit 15 120 Datenpaaren aus A- und E-Staub gebildet

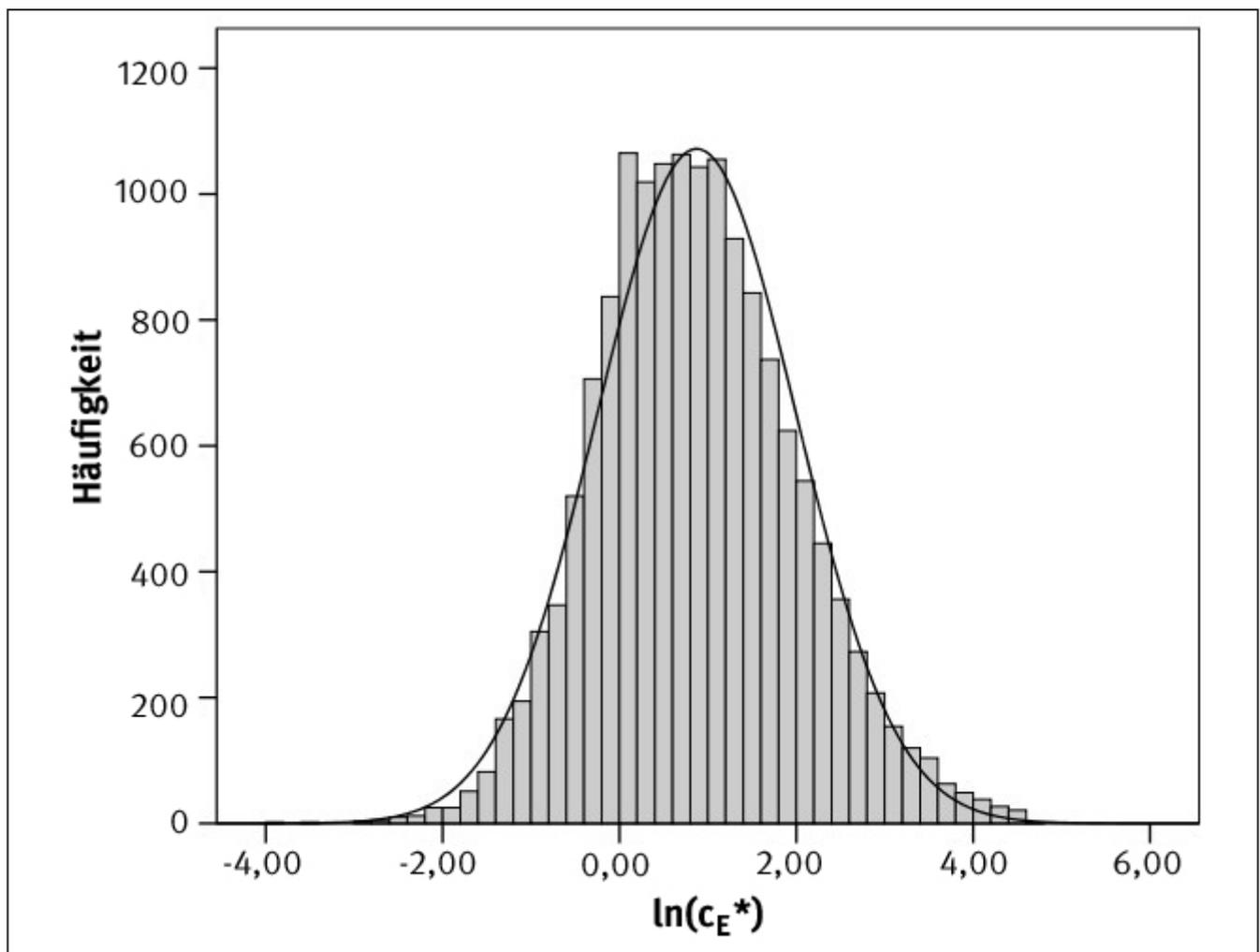
werden. Die Daten stammen aus den Jahren 1989 bis 2016 und beinhalten 818 verschiedene Arbeitsbereiche. Der am häufigsten beprobte Arbeitsbereich ist Metall-Aktivgas-schweißen (MAG-Schweißen) ($n = 797$). Die meisten Messungen sind bei einer Dauer von zwei Stunden durchgeführt worden ($n = 9\,648$). Die häufigste Probenahmeart ist „an der Person“ ($n = 7\,279$).

Lineare Regression

Die Histogramme von $\ln(c_A / \text{mg/m}^3)$ und $\ln(c_E / \text{mg/m}^3)$ zeigen trotz Transformation eine linkssteile bzw. rechtschiefe Verteilung der Daten (siehe exemplarisch Abbildung 4.1). Unterstützt wird diese Beobachtung durch den Kolmogorov-Smirnov-Test, der ein hochsignifikantes Ergebnis ($p < 0,001$) zeigt. Demnach wird die Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen: Die Messwerte sind nicht (log-)normalverteilt.

Abbildung 4.1:

Histogramm der logarithmierten E-Staub-Konzentrationen; äquidistante Abstände, Klassenbreite: 0,2



Es wird angenommen, dass A- und E-Staub nach Gl. (3.4) in Verbindung stehen; daher wird eine lineare Regression der logarithmierten Konzentrationen (Gl.(3.3)) für den Gesamtdatensatz durchgeführt.

Die Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regression werden erfüllt (Tabelle 4.1). Zur Überprüfung der Homoskedastizitätsvoraussetzung wird ein Residuenstreudiagramm erstellt (Abbildung 4.2). Außer einem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ und $c_A \leq 10 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E \leq 100 \text{ mg/m}^3$ sind keine Verteilungsmuster zu erkennen.

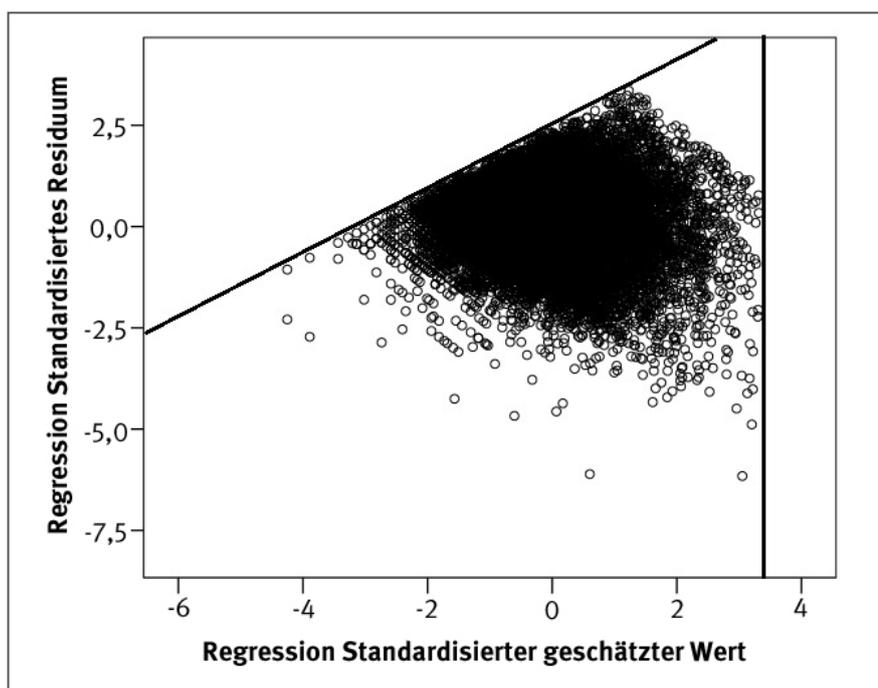
Tabelle 4.1:
Überprüfung der Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regression für alle Gruppen

Voraussetzungen/ Gruppe	Abhängige und unabhängige (Prädiktor) Variable müssen intervallskaliert sein.	Ein linearer Zusammenhang sollte zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable vorliegen.	Homoskedastizität sollte vorliegen.	Die Residuen müssen annähernd normalverteilt sein.	Die Residuen müssen unabhängig voneinander sein (keine Autokorrelation).	Es sollten keine Hebelwerte im Datensatz vorliegen.
0	Ja	Ja, Steigung ist $\neq 0$, ($p < 0,001$).	Ja, das Residuenstreudiagramm zeigt außer einem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ und $c_A \leq 10 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E \leq 100 \text{ mg/m}^3$ kein Muster (Abbildung 4.2).	Die grafische Beurteilung der Residuenhistogramme weist auf annähernde Normalverteilung hin. Rechnerisch sind die Residuen nicht normalverteilt, ($p < 0,001$).	Es liegt keine Autokorrelation vor.	$C_i < 1$; Grafisch: Keine Hebelwerte erkennbar.
1 - 6	Ja	Ja, Steigung ist $\neq 0$, ($p < 0,001$).	Ja, das Residuenstreudiagramm zeigt außer einem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ kein Muster (siehe exemplarisch Abbildung 4.5).	Grafisch: Residuen annähernd normalverteilt (siehe exemplarisch Abbildung 4.6). Rechnerisch: Nur die Residuen von <i>Oberflächenbearbeitung</i> ($p = 0,148$) und <i>Heißverarbeitung</i> ($p = 0,140$) normalverteilt.	Keine Autokorrelation für alle Gruppen außer Umformen: d liegt im Indifferenzbereich.	In allen Gruppen: $C_i < 1$ (größtes Distanzmaß in <i>Spanender Bearbeitung</i> : $C_i = 0,013$); Grafisch: Keine Hebelwerte erkennbar.
A - C	Ja	Ja, Steigung ist $\neq 0$, ($p < 0,001$).	Ja, das Residuenstreudiagramm zeigt außer einem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ kein Muster.	Grafisch: Residuen der Gruppen A und B annähernd normalverteilt. Rechnerisch: Residuen nicht normalverteilt (Gruppe A: $p < 0,001$; Gruppe B: $p = 0,001$; Gruppe C: $p = 0,022$).	Es liegt keine Autokorrelation vor.	In allen Gruppen: $C_i < 1$ (größtes Distanzmaß in Gruppe C: $C_i = 0,013$); Grafisch: Keine Hebelwerte erkennbar.
Kombinationsgruppen	Ja	Ja, Steigung ist $\neq 0$, ($p < 0,001$).	Ja, das Residuenstreudiagramm zeigt außer einem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ kein Muster.	Nur die Residuen der Gruppe 1-AC sind rechnerisch normalverteilt ($p = 0,120$). Grafisch sind die Residuen annähernd normalverteilt.	Es liegt keine Autokorrelation vor.	In allen Gruppen: $C_i < 1$, die Werte liegen im Bereich zwischen $0,04 \leq C_i \leq 0,118$. Grafisch: keine Hebelwerte erkennbar.

Voraussetzungen/ Gruppe	Abhängige und unabhängige (Prädiktor) Variable müssen intervallskaliert sein.	Ein linearer Zusammenhang sollte zwischen der abhängigen und unabhängigen Variable vorliegen.	Homoskedastizität sollte vorliegen.	Die Residuen müssen annähernd normalverteilt sein.	Die Residuen müssen unabhängig voneinander sein (keine Autokorrelation).	Es sollten keine Hebelwerte im Datensatz vorliegen.
Heuristische Gruppen	Ja	Ja, Steigung ist $\neq 0$, ($p < 0,001$). Der Wert 1 liegt nur bei <i>Löten</i> im Konfidenzintervall von k .	Ja, das Residuenstreudiagramm zeigt außer einem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ kein Muster.	Außer in den Gruppen <i>Schweißen</i> ($p < 0,001$), <i>Drahtziehen</i> ($p = 0,008$) und <i>Gießen</i> ($p < 0,001$) sind die Residuen normalverteilt.	Es liegt keine Autokorrelation vor.	In allen Gruppen: $C_i < 1$, die Werte liegen im Bereich zwischen $0,100 \leq C_i \leq 0,585$. Grafisch: Bei allen heuristischen Gruppen außer <i>Schweißen</i> und <i>Schleifen (mineralisch)</i> sind Hebelwerte erkennbar.
Inhaltsstoffgruppen	Ja	Ja, Steigung ist $\neq 0$, ($p < 0,001$). Der Wert 1 liegt nur bei <i>Mangan-Heißverarbeitung</i> im Konfidenzintervall von k .	Ja, die Residuenstreudiagramme zeigen keine Muster. Ausnahme: <i>Schweißen</i> . Außer dem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ ist aber kein Muster erkennbar.	Außer in den Gruppen <i>Mangan</i> , <i>Mangan-Heißverarbeitung</i> ($p < 0,001$), und <i>Mangan-Spanende Bearbeitung</i> ($p = 0,038$) sind die Residuen normalverteilt.	Es liegt keine Autokorrelation vor.	In allen Gruppen: $C_i < 1$. Grafisch: Es sind Hebelwerte erkennbar.

Abbildung 4.2:

Standardisiertes Residuenstreudiagramm des Gesamtdatensatzes mit erkennbaren Schnitten bei $c_A \leq c_E$ (diagonal verlaufende Hilfslinie) und $c_A \leq 10 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E \leq 100 \text{ mg/m}^3$ (senkrecht verlaufende Hilfslinie)

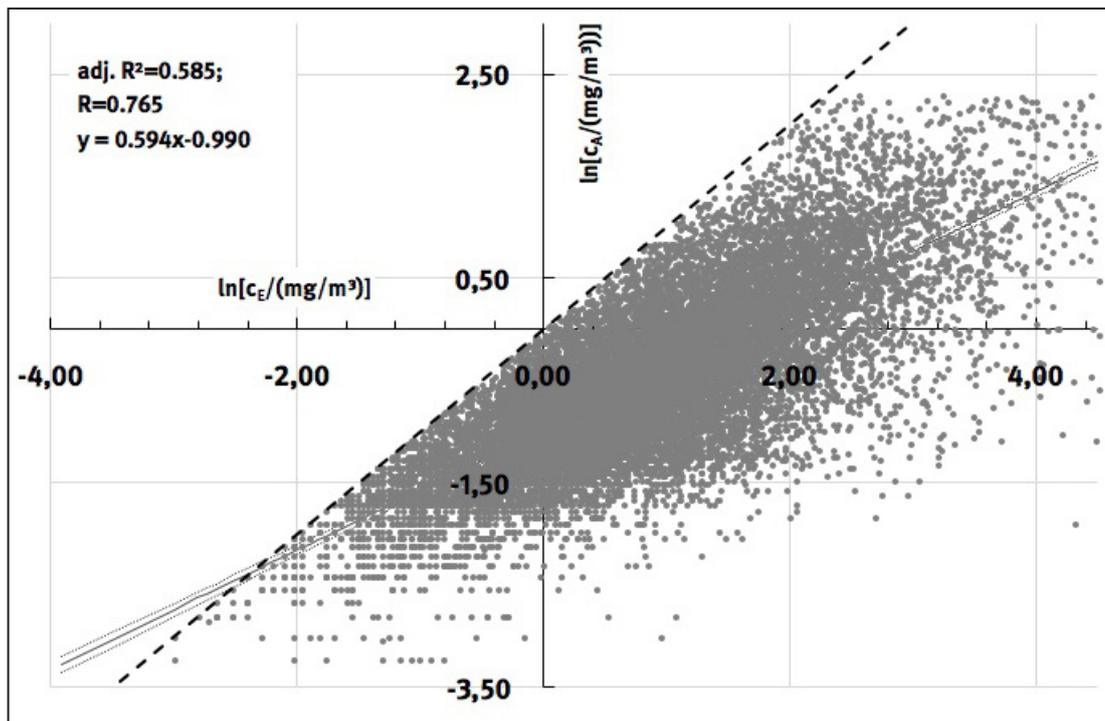


Der Gesamtdatensatz zeigt einen Korrelationskoeffizient (R) von 0,765 und ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß ($adj. R^2$) von 0,585 (Tabelle 4.6 auf Seite 54: Bz. 0, Gruppe: Gesamtdatensatz). Das zugehörige Streudiagramm mit Realmesswerten, Umrechnungsfunktion und 95%-Konfidenzintervall kann dem Anhang entnommen werden (siehe Abbildung 7.1 auf Seite 87).

Abbildung 4.3 zeigt das Streudiagramm für alle 15 120 logarithmisch transformierten Datenpaare mit linearer Regression und dem 95%-Konfidenzintervall. Der Schnitt, oberhalb der 1 : 1 Linie in diesem Diagramm, wird durch die Datenselektion $c_A \leq c_E$ verursacht. Zusätzlich sind die Schnitte bei $c_A > 10 \text{ mg/m}^3$ ($\ln(10) \approx 2,3$), $c_E > 100 \text{ mg/m}^3$ ($\ln(100) \approx 4,6$) erkennbar.

Abbildung 4.3:

Darstellung des transformierten Gesamtdatensatzes mit linearer Trendlinie (durchgezogene Linie), 95%-Konfidenzintervall (gepunktet) und 1 : 1 Linie (gestrichelt, schwarz)



Für den Gesamtdatensatz erhält man nach der Regressionsanalyse folgende Umrechnungsfunktion:

$$\frac{c_A}{\text{mg/m}^3} = \left(\frac{c_E}{\text{mg/m}^3} \right)^{0,594} * e^{-0,990} = \left(\frac{c_E}{\text{mg/m}^3} \right)^{0,594} * 0,372 \quad (4.1)$$

Anders ausgedrückt besagt diese Gleichung, dass bei einer E-Staub-Konzentration von 1 mg/m^3 eine A-Staub-Konzentration von $0,372 \text{ mg/m}^3$ zu erwarten wäre. Das entspricht einem prozentualen Anteil von 37,2 %. Da k und damit der Exponent der E-Staub-Konzentration < 1 ist, ist die Umrechnungsfunktion nicht linear. Daraus folgt, dass der Anteil der A-Fraktion unterhalb $c_E = 1 \text{ mg/m}^3$ größer als 37,2 % ist und bei einer E-Staub-Konzentration über 1 mg/m^3 kontinuierlich abnimmt.

Gesamtdatensatz ohne Konzentrationsgrenzen

Insgesamt gibt es 55 Messwertpaare bei denen $c_E > 100 \text{ mg/m}^3$ ist. Darüber hinaus gibt es 77 Messwertpaare, bei denen $c_A > 10 \text{ mg/m}^3$ gilt. 13 dieser Paare zeigen

sowohl $c_A > 10 \text{ mg/m}^3$ als auch $c_E > 100 \text{ mg/m}^3$. Die lineare Regressionsanalyse mit den 119 zusätzlichen Messwertpaaren ergibt ein $adj. R^2$ von 0,593 und $R = 0,770$. Im Vergleich zur Auswertung mit dem Restriktionskriterium (Tabelle 4.6 auf Seite 54: Bz. 0, Gesamtdatensatz) wird der Korrelationskoeffizient um 0,005 und das Bestimmtheitsmaß um 0,008 verbessert. Der Unterschied der Regressionskoeffizienten beträgt 0,007(k) und 0,001(C_0).

4.1.2 Gruppenbildung

Im nächsten Schritt werden – wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben – aus dem Gesamtdatensatz Gruppen gebildet, um eine verbesserte Beschreibung der Daten zu erreichen.

Tätigkeit

Aus dem Gesamtdatensatz werden sechs unabhängige Tätigkeitsgruppen gebildet (Tabelle 4.2). Die Histogramme aller Gruppen zeigen, wie der Gesamtdatensatz, rechtsschiefe Verteilungen. Lediglich die logarithmierten Messwerte des E-Staubs in der Gruppe *Sonstige* sind nicht signifikant ($p = 0,200$) von einer Normalverteilung verschieden. Die Varianzen von c_A / c_E zwischen den Tätigkeitsgruppen sind nicht homogen ($p < 0,001$).

Die Gruppen unterscheiden sich inhaltlich grundlegend voneinander. Aus statistischer Sicht unterscheidet sich nur das Verhältnis c_A / c_E der Gruppe *Heißverarbeitung* von allen anderen Gruppen hochsignifikant ($p < 0,001$). Dies wird deutlich, wenn man den Boxplot der Tätigkeitsgruppen vergleicht (Abbildung 4.4). Der Median der Gruppe 2 unterscheidet sich deutlich von den Medianen der anderen Gruppen.

Abbildung 4.4:
Boxplot der sechs Tätigkeitsgruppen in Abhängigkeit von ihrem Konzentrationsverhältnis

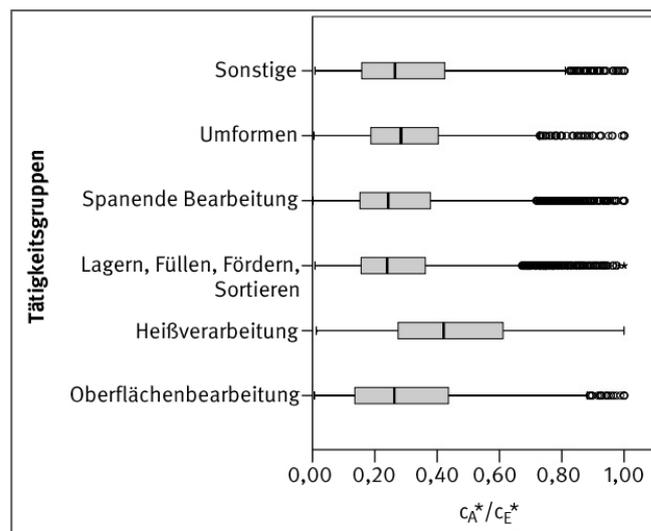


Tabelle 4.2:
Tätigkeitsgruppen mit Anzahl der Messwertpaare (Finalgruppen)

Gruppennummer	Gruppe	Anzahl der Messwertpaare (n)
1	Oberflächenbearbeitung	805
2	Heißverarbeitung	2 974
3	Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren	3 473
4	Spanende Bearbeitung	4 640
5	Umformen	1 348
6	Sonstige	1 880

Es wird im Nachfolgenden versucht, die Gruppe *Spanende Bearbeitung* in Untergruppen zu unterteilen. Dazu wird zum einen der Energieeintrag von Tätigkeiten untersucht, zum anderen die Einteilung der Norm DIN 8580 „Fertigungsverfahren“. Zunächst werden die folgenden Tätigkeiten mit hohem Energieeintrag ausgewählt: *Fräsen, Schleifen, Drehen*.

Es ist nicht möglich eine Gruppe aus diesen drei Tätigkeiten zu bilden, da die Mediane von c_A / c_E über die drei Gruppen nicht gleich sind ($p < 0,001$). Werden die Arbeitsbereiche einzeln betrachtet, so besteht nur in der Gruppe *Schleifen* ein signifikanter Unterschied des Konzentrationsverhältnisses zum Datensatz der *Spanenden Bearbeitung* (*Schleifen*: $p < 0,001$, *Fräsen*: $p = 0,897$, *Drehen*: $p = 0,115$). In der Tätigkeitsgruppe *Schleifen* unterscheiden sich die Materialgruppen A ($p = 0,070$) und C ($p = 0,299$) nicht signifikant vom Datensatz *Spanende Bearbeitung*. Es wäre anzunehmen, dass sich somit aus der Kombination *Schleifen-Metallisch-dominierte Stäube* eine heuristische Gruppe bilden ließe, jedoch nehmen Korrelationskoeffizient ($R = 0,747$) und korrigiertes Bestimmtheitsmaß ($adj.R^2 = 0,557$) der linearen Regressionsanalyse für diese Kombination kleinere Werte als

der Gesamtdatensatz ($R = 0,765$, $adj.R^2 = 0,585$) an. Aus diesem Grund wird diese Gruppe nicht berücksichtigt. In einem zweiten Schritt werden nach den Zuordnungen der Norm DIN 8580 „Fertigungsverfahren“ Untergruppen, die in Tabelle 4.3 dargestellt werden, gebildet.

Tabelle 4.3:
Untergruppe der Gruppe Spanende Bearbeitung nach DIN 8580

Untergruppe von <i>Spanende Bearbeitung</i>	Anzahl der Messwertpaare
Zerteilen	482
Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden	1 085
Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	2 205
Abtragen	14
Zerlegen	220
Reinigen	202
Putzen	150
Reparatur	29
Sonstige	248

Zwischen den Untergruppen gibt es keine Varianzhomogenität ($p < 0,001$). Die Mediane des Verhältnisses c_A / c_E sind über alle Gruppen von DIN 8580 hochsignifikant verschieden ($p < 0,001$). Bei paarweisen Vergleichen kann festgestellt werden, dass sich dabei die Mediane der Gruppen *Abtragen*, *Reinigen*, *Reparatur* und *Sonstige*, sowie *Zerteilen* und *Spanen mit geometrisch unbestimmten und bestimmten Schneiden* nicht signifikant unterscheiden. Aus inhaltlicher Sicht erscheint ein Zusammenschluss dieser Gruppen zu zwei Untergruppen jedoch wenig sinnvoll.

Die Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regression werden ausreichend erfüllt (siehe Tabelle 4.1 auf Seite 41). Exemplarisch wird das Residuenstreudiagramm der Gruppe *Oberflächenbearbeitung* dargestellt (Abbildung 4.5), das außer dem Schnitt bei $c_A \leq c_E$ kein Muster zeigt. Außerdem wird beispielhaft ein Residuenhistogramm der Gruppe *Heißverarbeitung* dargestellt, das annähernd eine Normalverteilung zeigt (Abbildung 4.6).

Mit Ausnahme von *Oberflächenbearbeitung* wird bei allen Tätigkeitsgruppen eine Verbesserung der Güte maße im Vergleich zum Gesamtdatensatz erzielt (siehe Tabelle 4.6 auf Seite 54). Der höchste Korrelationskoeffizient ($R = 0,818$) und das höchste Bestimmtheitsmaß ($adj.R^2 = 0,668$) wird in der Gruppe *Heißverarbeitung* erreicht. Die Regressionskoeffizienten $k = 0,729$ und $C_0 = -0,751$ unterscheiden sich stark von den Koeffizienten der anderen Gruppen. Die unterschiedlichen Werte für s_{Fit} weisen hauptsächlich auf die Abhängigkeit von n hin. Für alle Tätigkeitsgruppen wird eine Umrechnungsfunktion der E-Staub-Konzentration in die A-Staub-Konzentration angegeben (siehe Tabelle 4.6 auf Seite 54). Die zugehörigen Streudiagramme mit Realmesswerten, Umrechnungsfunktionen und 95%-Konfidenzintervallen sind dem Anhang (Abbildungen 7.2 bis 7.7) zu entnehmen.

Material

Die Messwertpaare des Gesamtdatensatzes werden nach ihren Angaben zur Materialbezeichnung unterteilt. Weitere Informationen resultieren, soweit vorhanden aus *IBA*, *Arbeitsbereich* und *Teilbetriebsart*. Die Einteilung erfolgte von zwei fachkundigen Personen unabhängig voneinander in zehn Materialuntergruppen (Tabelle 4.4). Die Ergebnisse dieser Personen sind verglichen und bei Unstimmigkeiten diskutiert worden.

Abbildung 4.5:
Exemplarisches Residuenstreudiagramm für Oberflächenbearbeitung

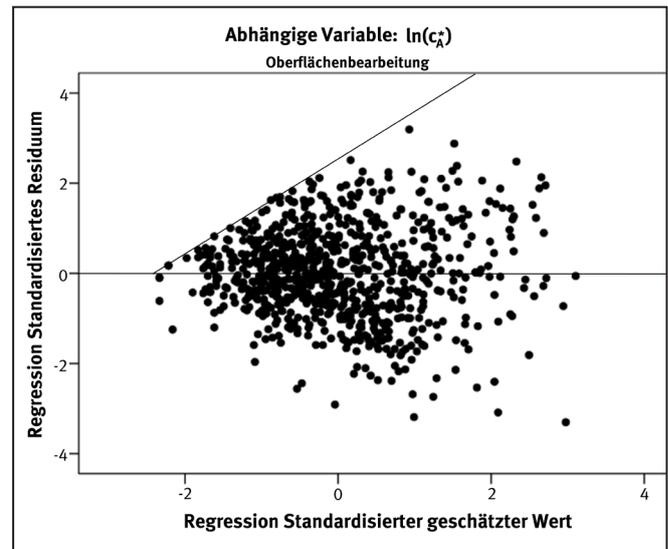
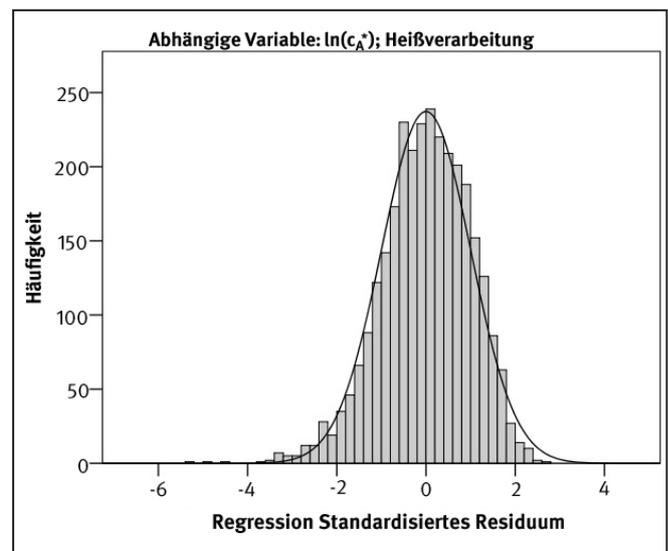


Abbildung 4.6:
Residuenhistogramm der Gruppe Heißverarbeitung, äquidistante Abstände, Klassenbreite: 0,2; mit Normalverteilungskurve



Die logarithmierten Konzentrationen in den jeweiligen Gruppen sind mit wenigen Ausnahmen nicht normalverteilt.

Tabelle 4.4:
Aus dem Gesamtdatensatz gebildete Materialgruppen

Materialgruppe	Anzahl der Messwertpaare
Kunststoff, Gummi, Epoxidharz, Pulverbeschichtung, Glasfaserverstärkter Kunststoff	799
Metall, inkl. Erze, Schlacke, metallische Strahlmittel	5 069
Mineralisch, inkl. Glas, Putze, Gips, Carbon, Graphit, Beton	7 576
Lacke, Anstrich	108
Textil	101
Mineralische Fasern, inkl. Keramikfasern	197
Papier	126
Asphalt, Bitumen	112
Elektroschrott	92
Sonstige	940

In der Gruppe *Lacke, Anstrich* wird die Nullhypothese für $\ln(c_E^*)$ und $\ln(c_A^*)$ angenommen ($\ln(c_E^*): p = 0,314$; $\ln(c_A^*): p = 0,410$), ebenso in den Gruppen *Textil* ($\ln(c_E^*): p = 0,669$), *Mineralische Fasern* ($\ln(c_E^*): p = 0,288$), *Papier* ($\ln(c_E^*): p = 0,065$), *Elektroschrott* ($\ln(c_E^*): p = 0,698$; $\ln(c_A^*): p = 0,059$). Die Gruppen untereinander zeigen Heteroskedastizität ($p < 0,001$) und die Mediane der Verhältnisse c_A / c_E unterscheiden sich über die Materialgruppen hinweg ($p < 0,001$). Durch die Überprüfung mittels Games-Howell-Test werden drei Finalgruppen aus den Untergruppen gebildet, die sich nicht signifikant unterscheiden und zudem ähnliche Materialien beinhalten (Tabelle 4.5).

Nur für $\ln(c_E^*)$ in Materialgruppe C kann eine Normalverteilung angenommen werden. Die drei Materialfinalgruppen zeigen keine Varianzhomogenität für c_A / c_E ($p < 0,001$) und in allen Gruppen unterscheiden sich die Mediane des Verhältnisses hochsignifikant ($p < 0,001$).

Tabelle 4.5:
Aufstellung der gebildeten Materialfinalgruppen

Gruppe	Finalgruppe	Untergruppen	n
A	<i>Mineralisch-dominiert</i>	Mineralisch, inkl. Glas, Putze, Gips, Carbon, Beton Kunststoff, Gummi, Epoxidharz, Pulverbeschichtung, Glasfaserverstärkter Kunststoff Sonstige	9 315
B	<i>Metallisch-dominiert</i>	Metall, inkl. Erze, Schlacke, metallische Strahlmittel Lacke, Anstrich Elektroschrott	5 269
C	<i>Faser-dominiert</i>	Textil Mineralische Fasern, inkl. Keramikfasern Asphalt, Bitumen Papier	536

Lineare Regression

Die Ergebnisse zur Überprüfung der Voraussetzungen für die lineare Regression werden in Tabelle 4.1 auf Seite 41 dargestellt. Mit der linearen Regressionsanalyse werden die Umrechnungsfunktionen von einatembarem in alveolengängigen Staub der Gruppen A bis C berechnet (siehe Tabelle 4.6 auf Seite 54). Die zugehörigen Streudiagramme mit Realmesswerten, Umrechnungsfunktionen und 95-%-Konfidenzintervallen sind dem Anhang (siehe Abbildungen 7.8 bis 7.10 auf den Seiten 90 bis 91) zu entnehmen. Die Regressionskoeffizienten der finalen Materialgruppen stimmen ungefähr mit denen des Gesamtdatensatzes überein.

Die Gruppen *Metallisch-dominiert* und *Faser-dominiert* weisen einen identischen Regressionskoeffizienten k ($k = 0,614$) auf. Der Korrelationskoeffizient und $adj.R^2$ verbessern sich nur für die Gruppe A ($R = 0,785$; $adj.R^2 = 0,616$) im Vergleich zum Gesamtdatensatz ($R = 0,765$; $adj.R^2 = 0,585$). Die Standardfehler von k und C_0 der finalen Materialgruppen sind in derselben Größenordnung wie die der Tätigkeitsfinalgruppen. Die leicht erhöhten Fehlerwerte für Gruppe C lassen sich durch die geringere Messwertzahl erklären. Mit derselben Begründung ist das Intervall von s_{Fit} der Gruppe C entsprechend größer.

Tabelle 4.6:

Regressionskoeffizienten k und C_0 mit Standardfehlern für Gl. 3.3 und s_{Fit} für die Gruppen 0 bis 6, A bis C, Kombinationsgruppen und den heuristischen Gruppen sowie deren Umrechnungsfunktionen und die Anzahl der Messwertpaare (n); Streudiagramme aller Gruppen im Anhang auf den Seiten 87 bis 100

Bz.	Gruppe	n	R	$adj. R^2$	C_0	k	$s_{Fit}(\ln(c_A^*))$	Umrechnungsfunktion
0	Gesamtdatensatz Tätigkeiten	15 120	0,765	0,585	$-0,990 \pm 0,006$	$0,594 \pm 0,004$	0,0092 bis 0,0400	$c_A^* = (c_E^*)^{0,594} \times e^{-0,990}$
1	Oberflächenbearbeitung	805	0,735	0,540	$-1,046 \pm 0,024$	$0,500 \pm 0,016$	0,0427 bis 0,1396	$c_A^* = (c_E^*)^{0,500} \times e^{-1,046}$
2	Heißverarbeitung	2 974	0,818	0,668	$-0,751 \pm 0,011$	$0,729 \pm 0,009$	0,0184 bis 0,0708	$c_A^* = (c_E^*)^{0,729} \times e^{-0,751}$
3	Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren	3 473	0,791	0,626	$-1,093 \pm 0,012$	$0,586 \pm 0,008$	0,0192 bis 0,0698	$c_A^* = (c_E^*)^{0,586} \times e^{-1,093}$
4	Spanende Bearbeitung	4 640	0,776	0,602	$-1,031 \pm 0,016$	$0,578 \pm 0,013$	0,0169 bis 0,0553	$c_A^* = (c_E^*)^{0,578} \times e^{-1,031}$
5	Umformen	1 348	0,774	0,599	$-1,037 \pm 0,011$	$0,579 \pm 0,007$	0,0272 bis 0,1071	$c_A^* = (c_E^*)^{0,579} \times e^{-1,037}$
6	Sonstige Material	1 880	0,768	0,590	$-1,100 \pm 0,016$	$0,593 \pm 0,011$	0,0275 bis 0,1106	$c_A^* = (c_E^*)^{0,593} \times e^{-1,100}$
A	Mineralstaub-dominant/Sonstige	9 315	0,785	0,616	$-1,058 \pm 0,007$	$0,581 \pm 0,005$	0,0119 bis 0,0512	$c_A^* = (c_E^*)^{0,581} \times e^{-1,058}$
B	Metallstaub-dominant	5 269	0,748	0,559	$-0,851 \pm 0,010$	$0,614 \pm 0,008$	0,0146 bis 0,0531	$c_A^* = (c_E^*)^{0,614} \times e^{-0,851}$
C	Faser-dominant Kombinationsgruppen	536	0,761	0,578	$-1,176 \pm 0,031$	$0,614 \pm 0,023$	0,0543 bis 0,1977	$c_A^* = (c_E^*)^{0,614} \times e^{-1,176}$
1-AC	Oberflächenbearbeitung-Mineralstaub/Faserstaub-dominant	553	0,762	0,581	$-1,106 \pm 0,030$	$0,523 \pm 0,019$	0,0549 bis 0,1643	$c_A^* = (c_E^*)^{0,523} \times e^{-1,106}$
2-B	Heißverarbeitung-Metallstaub-dominant	2 265	0,840	0,706	$-0,687 \pm 0,013$	$0,758 \pm 0,010$	0,0268 bis 0,0961	$c_A^* = (c_E^*)^{0,758} \times e^{-0,687}$
4-A	Spanende Bearbeitung-Mineralstaub-dominant	2 632	0,802	0,643	$-1,015 \pm 0,026$	$0,595 \pm 0,017$	0,0227 bis 0,0732	$c_A^* = (c_E^*)^{0,595} \times e^{-1,015}$
6-BC	Sonstige-Metallstaub/Faserstaub-dominant Heuristische Gruppen	548	0,775	0,601	$-1,067 \pm 0,029$	$0,647 \pm 0,023$	0,0510 bis 0,1933	$c_A^* = (c_E^*)^{0,647} \times e^{-1,067}$
α	Löten	34	0,917	0,835	$-0,559 \pm 0,074$	$0,946 \pm 0,073$	0,1634 bis 0,4417	$c_A^* = (c_E^*)^{0,946} \times e^{-0,559}$
β	Gießen (Metall)	77	0,877	0,767	$-0,430 \pm 0,058$	$0,913 \pm 0,049$	0,0857 bis 0,2322	$c_A^* = (c_E^*)^{0,913} \times e^{-0,430}$
γ	Schweißen	1 126	0,875	0,766	$-0,601 \pm 0,018$	$0,803 \pm 0,014$	0,0297 bis 0,1005	$c_A^* = (c_E^*)^{0,803} \times e^{-0,601}$
δ	Sägen (mineralisch)	54	0,933	0,869	$-1,064 \pm 0,063$	$0,824 \pm 0,044$	0,1612 bis 0,4878	$c_A^* = (c_E^*)^{0,824} \times e^{-1,064}$
ϵ	Hochtemperaturschneiden	176	0,897	0,803	$-0,716 \pm 0,028$	$0,750 \pm 0,028$	0,0832 bis 0,2832	$c_A^* = (c_E^*)^{0,750} \times e^{-0,716}$
ζ	Schleifen (mineralisch)	107	0,908	0,824	$-0,948 \pm 0,061$	$0,747 \pm 0,034$	0,1137 bis 0,2617	$c_A^* = (c_E^*)^{0,747} \times e^{-0,948}$
η	Walzen	35	0,925	0,852	$-0,763 \pm 0,063$	$0,742 \pm 0,053$	0,2016 bis 0,5390	$c_A^* = (c_E^*)^{0,742} \times e^{-0,763}$

Bz.	Gruppe	n	R	adj. R ²	C ₀	k	s _{Fit} (ln(c _A [*]))	Umrechnungsfunktion
θ	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} × e ^{-1,107}
ι	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} × e ^{-1,264}
κ	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} × e ^{-1,028}
λ	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} × e ^{-1,059}

Verknüpfung von Tätigkeiten und Material

Um nach Möglichkeit weitere Untergruppen zu bilden, werden die Tätigkeitsgruppen nach den drei Materialgruppen unterteilt. In Tabelle 4.7 werden jeweils die Ergebnisse des Levene-Tests für Varianzhomogenität zwischen den Materialgruppen innerhalb der betrachteten Tätigkeitsgruppe dargestellt und ob sich die Mediane von c_A / c_E über die Materialgruppen innerhalb der Tätigkeit

signifikant unterscheiden. Zuletzt werden die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der Gruppen angegeben.

In den Gruppen 3 und 4 gibt es keinen Unterschied der medianen Konzentrationsverhältnisse zwischen den Materialgruppen; aus diesem Grund werden hier keine paarweisen Vergleiche durchgeführt. Des Weiteren werden für die Kombinationsgruppen die Regressionskoeffizienten und Gütemaße ermittelt (Tabelle 4.8 auf Seite 56).

Tabelle 4.7:

Testergebnisse der verknüpften Gruppen, Varianzhomogenität der Materialgruppen innerhalb der jeweiligen Tätigkeitsgruppe, Signifikanz der Materialgruppen innerhalb der jeweiligen Tätigkeitsgruppe; * - keine Unterschiede zwischen den Untergruppen

Tätigkeitsgruppe	Varianzhomogenität über A bis C	Signifikanz Varianzanalyse über A bis C	Materialgruppen Vergleich	Signifikanz Games-Howell Test
(1) Oberflächenbearbeitung (n = 805)	gegeben (p = 0,305)	p < 0,001	A-B A-C B-C	p < 0,001 p = 0,995 p = 0,274
(2) Heißverarbeitung (n = 2 974)	gegeben (p = 0,053)	p < 0,001	A-B A-C B-C	p < 0,001 p = 0,871 p = 0,087
(3) Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren (n = 3 473)	gegeben (p = 0,780)	p = 0,166	*	*
(4) Spanende Bearbeitung (n = 4 640)	nicht gegeben (p < 0,001)	p = 0,052	*	*
(5) Umformen (n = 1 348)	nicht gegeben (p = 0,008)	p = 0,089	*	*
(6) Sonstige (n = 1 880)	nicht gegeben (p = 0,005)	p < 0,01	A-B A-C B-C	p < 0,001 p < 0,001 p = 0,998

Die Kombinationen 1-C und 5-C beinhalten weniger als 30 Messwertpaare. Um diese Gruppen einzeln zu betrachten, ist diese Anzahl zu gering. In der Tätigkeitsgruppe *Oberflächenbearbeitung* unterscheidet sich das Verhältnis c_A / c_E zwischen den Materialgruppen *mineralisch-dominierte Stäube* (A) und *metallisch-dominierte Stäube* (B). Da die Gruppen A und C bei *Oberflächenbearbeitung* einen größeren p-Wert aufweisen als die Gruppen B und C (Tabelle 4.7), werden die Gruppen 1-A und 1-C zu einer Kombinationsgruppe zusammengefasst; so unterscheidet sich das Konzentrationsverhältnis von 1-AC und 1-B hochsignifikant (p < 0,001). Gleiches gilt für die Tätigkeitsgruppe *Heißverarbeitung*. Die Gruppen

A und C werden hier ebenfalls aufgrund des höheren p-Werts (p = 0,871) zusammengefasst. Der Unterschied der Konzentrationsverhältnisse zwischen den Gruppenkombinationen 2-AC und 2-B ist hochsignifikant (p < 0,001). Bei *Sonstige* gibt es keinen Unterschied der Konzentrationsverhältnisse zwischen den Materialgruppen B und C.

Die Mediane von c_A / c_E der Gruppen B und C unterscheiden sich nicht signifikant (p = 0,998) und werden aus diesem Grund zusammengefasst. Der Unterschied des Verhältnisses zwischen den Gruppenkombinationen 6-A und 6-BC ist hochsignifikant (p < 0,001).

Die Betrachtungen zur Durchführung der linearen Regressionsanalyse der Kombinationsgruppen sind in Tabelle 4.1 auf Seite 41 beschrieben. Die Gruppen 2-B ($adj.R^2 = 0,706$), 4-A ($adj.R^2 = 0,643$), 1-AC ($adj.R^2 = 0,581$) und 6-BC ($adj.R^2 = 0,601$) weisen im Vergleich zu ihren zugehörigen Tätigkeitsgruppen (*Heißverarbeitung*: $adj.R^2 = 0,668$, *Spanende Bearbeitung*: $adj.R^2 = 0,602$, *Oberflächenbearbeitung*: $adj.R^2 = 0,540$, *Sonstige*: $adj.R^2 = 0,590$) ein verbessertes korrigiertes Bestimm-

heitsmaß auf. Dies ist bei allen anderen Kombinationsgruppen nicht der Fall. Aus diesem Grund sind nur vier finale Kombinationsgruppen relevant: 1-AC, 2-B, 4-A und 6-BC (Tabelle 4.6 auf Seite 54). Die zugehörigen Streudiagramme mit Realmesswerten, Umrechnungsfunktionen und 95-%-Konfidenzintervallen sind dem Anhang (siehe Abbildungen 7.11 bis 7.14 auf den Seiten 92 bis 93) zu entnehmen.

Tabelle 4.8:
Gütemaße und Messwertanzahl der Regressionsanalyse für die Kombinationsgruppen

Tätigkeitsgruppe	Materialgruppe	n	R	adj. R ²
(1) Oberflächenbearbeitung	A	540	0,756	0,571
	B	253	0,641	0,408
	C	3	0,866	0,726
(2) Heißverarbeitung	A	667	0,756	0,571
	B	2 265	0,840	0,706
	C	42	0,866	0,745
(3) Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren	A	2 919	0,790	0,624
	B	412	0,798	0,635
	C	142	0,798	0,635
(4) Spanende Bearbeitung	A	2 632	0,802	0,643
	B	1 911	0,747	0,557
	C	97	0,591	0,343
(5) Umformen	A	1 225	0,777	0,603
	B	98	0,774	0,595
	C	5	0,706	0,477
(6) Sonstige	A	1 332	0,766	0,586
	B	331	0,779	0,606
	C	217	0,757	0,572

Heuristische Gruppen

Im Nachfolgenden werden die heuristischen Gruppen beschrieben, die sehr spezifisch und nicht systematisch aus einzelnen Arbeitsbereichen gebildet worden sind.

Fünf der gebildeten heuristischen Gruppen stammen aus der Kombinationsgruppe 2-B, drei Gruppen aus 4-A, jeweils eine Gruppe aus 3-A, 5-B und eine weitere aus der

Oberflächenbearbeitung mit verschiedenen Materialien (Tabelle 4.9). Es werden wenige sehr spezifische Arbeitsbereiche zu einer heuristischen Gruppe zusammengefasst. Gebildete Umrechnungsfunktionen sind nur im Rahmen dieser Arbeitsbereiche gültig. Die Gruppen umfassen (mit Ausnahme der Gruppe *Schweißen*) einen geringeren Messwertumfang ($34 \leq n \leq 176$). Die logarithmierten Messwerte aller Gruppen (mit Ausnahme von *Schweißen*) sind normalverteilt.

Tabelle 4.9:
Heuristische Gruppen, ihre Stammgruppen, Materialien, berücksichtigte Arbeitsbereiche und n

Gr.	Gruppenname	Stammgruppe	Arbeitsbereiche	Material	n
α	Löten	2-B	Hartlöten, Flammlöten; Lichtbogenlöten, MIG-Löten; Weichlöten; Weichlöten, Flammlöten	Metall	34
β	Gießen (Metall)	2-B	Kaltkammer-Druckgießmaschine oder -anlage; Stranggießmaschine oder -anlage; Warmkammer-Druckgießmaschine oder -anlage	Metall	77

Gr.	Gruppenname	Stammgruppe	Arbeitsbereiche	Material	n
γ	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	1126
δ	Sägen (mineralisch)	4-A	Be- und Nachbearbeitung, Beton sägen; Putzerei, Werkstück sandbehaftet oder vorgeputzt bzw. gestrahlter Sandguss, Trennen mit Trennscheibe oder Sägeblatt; Sägen, nass	Mineralisch	54
ε	Hochtemperaturschneiden	2-B	Brennschneiden Laserstrahlschneiden; Plasmaschneiden, allgemein	Metall	176
ζ	Schleifen (mineralisch)	4-A	Putzerei, Werkstück, sandbehaftet und sandfrei, Schleifen mit Handschleifmaschine oder Schleifbock (Einfach- oder Doppelschleifbock); Schleiferei, Poliererei, manuelles Schleifen	Mineralisch	107
η	Walzen	5-B	Walzen; Walzbetrieb, allgemein	Metall	35
θ	Strahlen	1	Be- und Nachbearbeitung Putzerei, Strahlen, Strahlmittel Quarzsand, Werkstück sandbehaftet, Raum; Sandstrahlen; Strahlanlagen, trocken, offen	Alle Materialien	57
ι	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
κ	Drahtziehen	2-B	Drahtziehen	Metall	61
λ	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 Farbenaufbereitung, 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

Lineare Regression

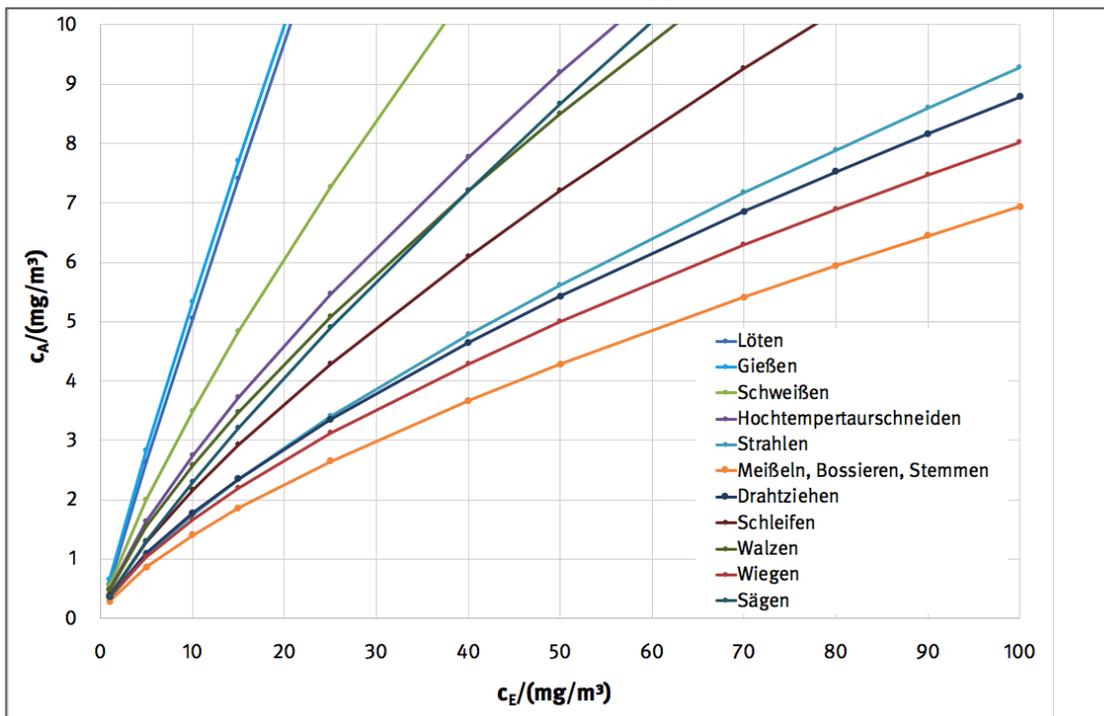
Die Ergebnisse zur Überprüfung der Voraussetzungen der linearen Regression werden in Tabelle 4.1 auf Seite 41 dargestellt.

Die heuristischen Gruppen zeigen alle ein verbessertes $adj.R^2$ im Vergleich zum Gesamtdatensatz und ihrer Stammgruppe. Es werden Korrelationskoeffizienten zwischen 0,933 und 0,859 bzw. Bestimmtheitsmaße zwischen 0,869 und 0,733 erreicht. Das höchste Bestimmtheitsmaß kann für die Gruppe *Sägen* angegeben werden ($adj.R^2 = 0,869$). Abbildung 4.7 zeigt die Funktionen der heuristischen Gruppen für Gl. (3.4) unter Berücksichtigung der berechneten Regressionskoeffizienten.

Die zugehörigen Streudiagramme mit Realmesswerten, Umrechnungsfunktionen und 95-%-Konfidenzintervallen sind dem Anhang (Abbildungen 7.15 bis 7.25 auf den Seiten 94 bis 99) zu entnehmen.

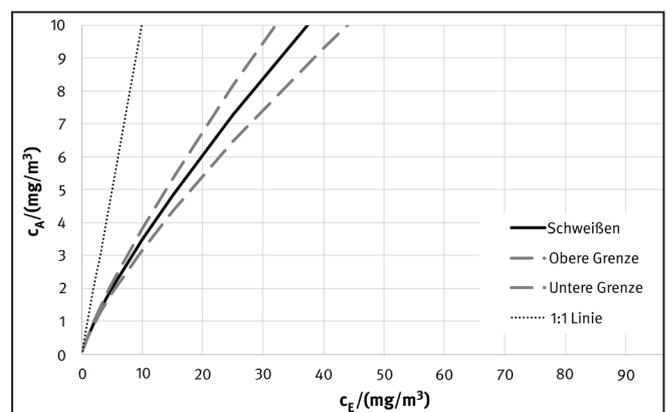
Die Funktionen unterscheiden sich stark voneinander. Die Gruppen *Löten* und *Gießen* nehmen einen nahezu linearen Verlauf ($k \approx 1$), während k für z. B. *Meißeln*, *Bossieren*, *Stemmen* bei ähnlichem Bestimmtheitsmaß ($adj.R^2 = 0,827$) sehr viel niedriger ist ($k = 0,695$). Die Regressionskoeffizienten k der Gruppen *Drahtziehen* und *Meißeln*, *Bossieren*, *Stemmen* sind darüber hinaus gleich ($k = 0,695$), während sich C_0 um ca. 0,24 unterscheidet.

Abbildung 4.7: Darstellung der Funktionen nach Gl. (3.4) der heuristischen Gruppen ohne Realmesswerte



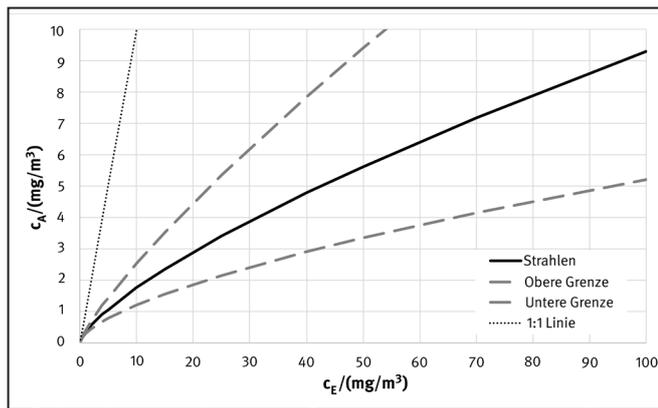
Durch Abbildung 4.7 wird darüber hinaus sehr deutlich, dass *Tätigkeit* und *Material* Einfluss auf die berechnete Konzentration c_A haben. Wird z.B. $c_E = 10 \text{ mg/m}^3$ gemessen, so kann c_A zwischen $\approx 5,4 \text{ mg/m}^3$ (*Gießen*) und $\approx 1,5 \text{ mg/m}^3$ (*Meißeln, Bossieren, Stemmen*) variieren.

Abbildung 4.8: Umrechnungsfunktion von *Schweißen* ($n = 1126$) mit 95-%-Konfidenzintervall und 1 : 1 Linie (gepunktet)



Im Vergleich zu den anderen Finalgruppen zeigen die heuristischen Gruppen einen größeren Standardfehler der Regressionskoeffizienten. Dies ist durch die geringere Anzahl der Messwertpaare zu begründen. Dies gilt ebenfalls für den breiteren s_{Fit} Bereich. Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen exemplarisch die Regressionsfunktionen mit dem 95-%-Konfidenzintervall (das über s_{Fit} berechnet worden ist) für die Gruppen *Schweißen* und *Strahlen*. *Schweißen* beinhaltet eine deutlich größere Messwertanzahl als *Strahlen*, das Resultat ist ein schmäleres Konfidenzintervall der Umrechnungsfunktion.

Abbildung 4.9:
Umrechnungsfunktion von *Strahlen* ($n = 57$) mit 95%-Konfidenzintervall und 1 : 1 Linie (gepunktet)



In allen heuristischen Gruppen (mit Ausnahme von *Schweißen* und *Schleifen (mineralisch)*) sind im Streudiagramm jeweils ein bis zwei „leverage points“ erkennbar, obwohl in jeder Gruppe $C_i < 1$ gilt. Exemplarisch werden die Streudiagramme der Gruppen *Drahtziehen* und *Gießen* dargestellt (Abbildungen 4.10 und 4.11).

Werden die markierten Punkte (bei *Drahtziehen* ($c_E|c_A$) = (45,60|4,77), bei *Gießen* ($c_E|c_A$) = (8,54|6,62) bei der linearen Regressionsanalyse nicht mit berücksichtigt, ergeben sich für *Drahtziehen* leicht verschlechterte Gütemaße ($adj.R^2 = 0,714$ vs. $0,733$, bzw. $R = 0,848$ vs. $0,859$), während die Regressionskoeffizienten nahezu konstant bleiben ($\Delta C_o = 0,002$; $\Delta k = 0,002$).

Bei *Gießen* verschlechtern sich die Gütemaße ($adj.R^2 = 0,749$ vs. $0,770$, bzw. $R = 0,867$ vs. $0,877$) und k ändert sich stärker im Vergleich zu C_o ($\Delta C_o = 0,001$; $\Delta k = 0,016$), sodass k einen neuen Wert von $0,897$ (im Vergleich zu $0,913$) annimmt. Dadurch wird deutlich, dass dieser Punkt entscheidend zur Linearität der Regressionsfunktion in dieser Gruppe beiträgt.

Abbildung 4.10:
Streudiagramm der heuristischen Gruppe *Drahtziehen* mit zwei Regressionsfunktionen: mit Hebelwert (schwarz gestrichelte Linie), ohne Hebelwert (grau gestrichelte Linie), 1 : 1 Linie (gepunktete, schwarze Linie) und markiertem Hebelwert

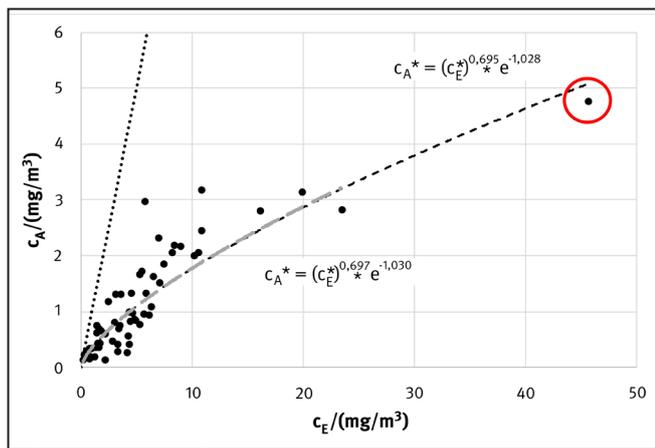
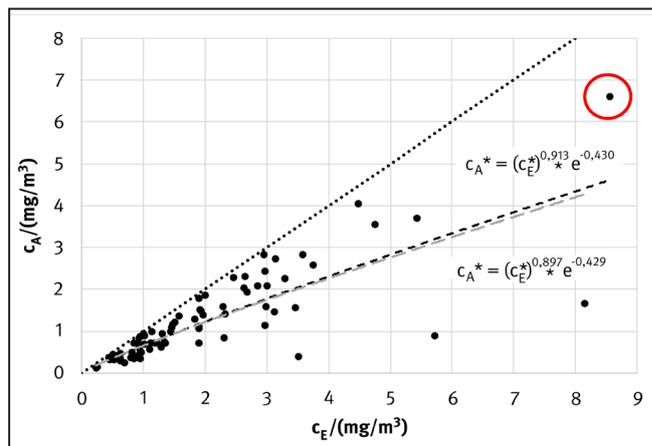


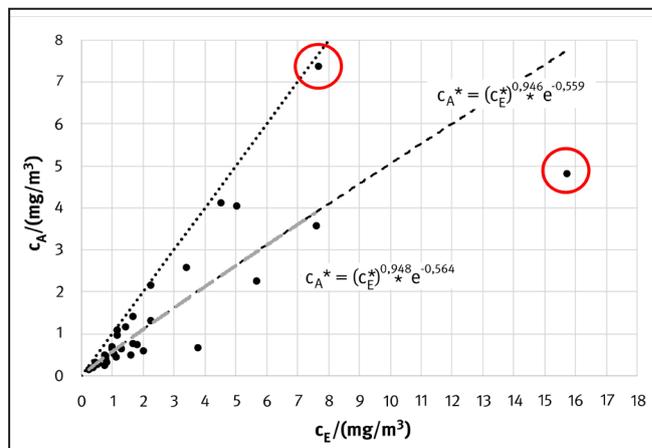
Abbildung 4.11:
Streudiagramm der heuristischen Gruppe *Gießen* mit zwei Regressionsfunktionen: mit Hebelwert (schwarz gestrichelte Linie), ohne Hebelwert (grau gestrichelte Linie), 1 : 1 Linie (gepunktete, schwarze Linie) und markiertem Hebelwert



Das letzte Streudiagramm der heuristischen Gruppen, das betrachtet werden soll, ist das der Gruppe *Löten* (Abbildung 4.12). Diese Gruppe weist als einzige heuristische Gruppe den Wert 1 im 95%-Konfidenzintervall des Regressionskoeffizienten k auf und suggeriert damit einen linearen Zusammenhang zwischen A- und E-Staub.

Betrachtet man das Streudiagramm der Gruppe, sind zwei Hebelwerte erkennbar (siehe Markierungen im Streudiagramm). Der Punkt ($c_E|c_A$) = (7,66|7,40) scheint entscheidend für die Linearität der Regressionsfunktion dieser Gruppe zu sein. Wird der Punkt bei der Auswertung nicht mit berücksichtigt, so ändert sich k ($k(\text{ohne Hebelwert}) = 0,907 \pm 0,074$) und der Wert 1 liegt nicht mehr im Konfidenzintervall.

Abbildung 4.12:
Streudiagramm der heuristischen Gruppe *Löten* mit zwei Regressionsfunktionen: mit Hebelwerten (schwarz gestrichelte Linie), ohne Hebelwerte (graugestrichelte Linie), 1 : 1 Linie (gepunktete, schwarze Linie) und markierten Hebelwerten



Im Streudiagramm fällt noch ein weiterer Punkt auf, der einen deutlich höheren E-Staub-Wert aufweist als die restlichen Messwertpaare der Gruppe: $(c_e|c_a) = (15,7|4,84)$. Wird bei der Regressionsanalyse auch dieser Punkt nicht berücksichtigt, nehmen die Regressionskoeffizienten vergleichbare Werte an wie bei der Analyse mit beiden Hebelwerten ($\Delta k = 0,002$; $\Delta C_o = 0,005$), während die Gütemaße schlechter werden ($R = 0,900$ vs. $R = 0,917$ (mit Hebelwerten) bzw. $adj.R^2 = 0,803$ vs. $adj.R^2 = 0,835$ (mit Hebelwerten)).

Betrachtet man alle heuristischen Gruppen, die Hebelwerte aufweisen, und entfernt diese Punkte zur Durchführung einer vergleichenden Regressionsanalyse, so ändern sich die Regressionskoeffizienten um $0,001 \leq \Delta k \leq 0,039$ bzw. $0,011 \leq \Delta C_o \leq 0,010$ und die Gütemaße um $0,002 \leq \Delta R \leq 0,023$ bzw. $0,003 \leq \Delta adj.R^2 \leq 0,043$.

Probennahmesysteme

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Probennahmesysteme und deren Einfluss auf das Rechenmodell in dieser Arbeit beschrieben. Zur Messung der E-Fraktion sind am häufigsten die Probennahmesysteme GSP, VC-25 G und GSP-10 verwendet worden (Tabelle 4.10), zur Ermittlung der A-Staub-Konzentrationen am häufigsten die Probennahmesysteme FSP-10, VC-25 F und PM4 F (Tabelle 4.11).

Die Geräte beider Staubfraktionen werden zur parallelen Messung der Staubexposition kombiniert. Die häufigsten PS-Kombinationen sind VC-25 G und F bei stationären sowie GSP und FSP-10 bei personengetragenen Messungen (Tabelle 4.12).

Tabelle 4.10:
Probennahmesysteme zur Messung der E-Fraktion

Bezeichnung	Anzahl der Messungen
GSP	7 390
VC-25 G	4 000
GSP-10	2 872
PM4 G	830
PGP-EA	20
PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	4
G-Viellochkopf	2
PM4 G-D	1
PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	1

Tabelle 4.11:
Probennahmesysteme zur Messung der A-Fraktion

Bezeichnung	Anzahl der Messungen
FSP-10	9 269
VC-25 F	3 988
PM4 F	1 188
FSP-2	622
PGP-EA	21
VC-25 Impaktor	18
MPG II	7
PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	4
Casella T 13043-3	2
PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	1

Tabelle 4.12:
Liste der am häufigsten verwendeten Probennahmesystemen für Parallelmessungen von A- und E-Staub

Messsystem E-Staub	Messsystem A-Staub	n	Probennahmeart
VC-25 G	VC-25 F	3 788	stationär
GSP	FSP-10	1 298	stationär
GSP-10	FSP-10	854	stationär
PM4-G	PM4-F	799	stationär
VC-25 G	PM4-F	169	stationär
GSP-10	PM4-F	155	stationär
GSP	FSP-10	5 273	personengetragen
GSP-10	FSP-10	1 822	personengetragen
GSP	FSP-2	495	personengetragen

Die Probennahmesysteme VC-25 G, PM4 G, GSP-10 und GSP werden zur Messung der E-Fraktion in allen sechs Tätigkeitsgruppen verwendet (Abbildung 4.13). Die Probennahmesysteme PGP-EA Komplettsystem für Schweißerschutzschirm ($n = 4$), G-Viellochkopf ($n = 2$), PM4 G-D ($n = 1$) und PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm ($n = 1$) werden insgesamt nur bei acht Messungen verwendet und das PGP-EA ohne Zusatzangabe in nur 20 Fällen (0,13 % des Gesamtdatensatzes). Diese Systeme werden nur selektiv in den Tätigkeitsgruppen eingesetzt. Gleichzeitig werden diese Verfahren nicht standardmäßig zur Messung von A- und E-Staub verwendet.

Die am häufigsten zu Messungen des A-Staubes verwendeten Geräte VC-25 F, PM4 F, FSP- 2 und FSP-10 werden ebenfalls in allen Tätigkeitsgruppen eingesetzt (diese Messwerte repräsentieren 99,65 % des Gesamtdatensatzes). Analog zur E-Fraktion werden für die A- Fraktion mit den übrigen Probennahmesystemen einzelne Messungen bei ausgewählten Tätigkeiten durchgeführt (Abbildung 4.14). Diese restlichen 0,35 % der Messwertpaare entfallen auf die Probennahmesysteme PGP-EA ($n = 21$), VC-25 Impaktor ($n = 18$), MPG II ($n = 7$), PGP-EA Komplettsystem für Schweißerschutzschirm ($n = 4$), Casella ($n = 2$) und PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm ($n = 1$).

Aufgrund der Streudiagramme (Abbildungen 4.13 und 4.14 auf Seite 62) wird deutlich, dass es keine Abhängigkeit zwischen den Probennahmesystemen, die für Messungen

der E- bzw. A-Fraktion verwendet werden und der beprobten Tätigkeit gibt. Die Systeme, die nur selektiv verwendet worden sind, machen nur einen verschwindend geringen Anteil am Gesamtdatensatz aus und sind vernachlässigbar.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die Wahl der Probennahmesysteme in Abhängigkeit der Messtechnischen Dienste betrachtet (Abbildung 4.15 und 4.16 auf den Seiten 63 und 64). Die Sammler VC-25 G/F werden breitgefächert für Messungen in Bauwirtschaft, Metallverarbeitung, Textil, Lager, Holz, Rohstoffe und chemischer Industrie verwendet; Gleiches gilt für GSP und GSP-10 bzw. FSP-2 und FSP-10. Der Einsatz des PM4 G- und PM4 F-Sammlers deckt ebenfalls alle relevanten Materialien Mineralisch (insbesondere Bauwirtschaft), Textil, Holz und Metall ab.

Abbildung 4.13:

Balkendiagramm der E-Staub-PS gegen Tätigkeitsgruppen; Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Tätigkeitsgruppe siehe Anhang (Tabelle 7.2 auf Seite 102)

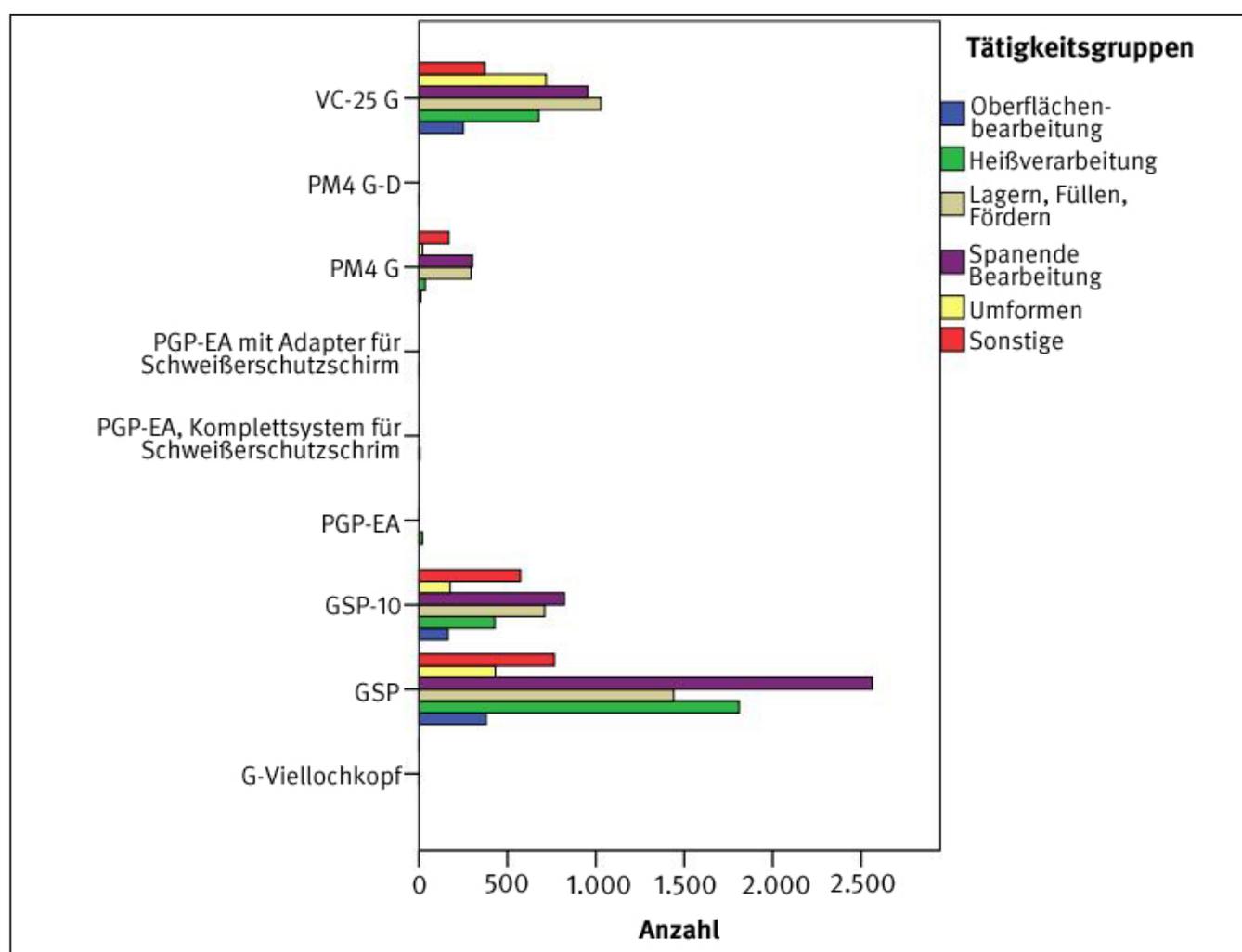


Abbildung 4.14:

Balkendiagramm der A-Staub-PS gegen Tätigkeitsgruppen; Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Tätigkeitsgruppe siehe Anhang (Tabelle 7.1 auf Seite 101)

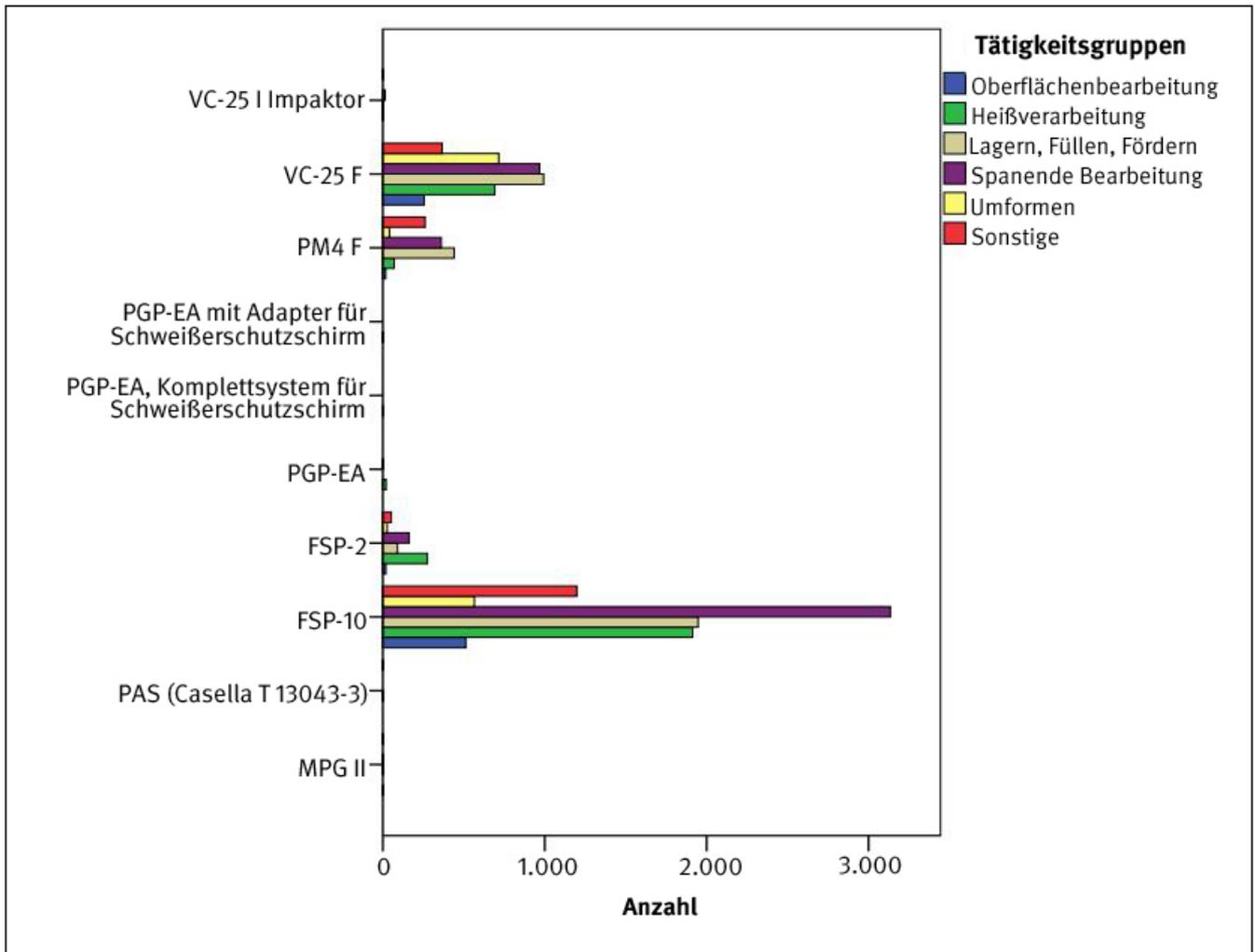


Abbildung 4.15:

Wahl der Probennahmesysteme in Abhängigkeit der Messtechnischen Dienste (E-Staub); Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Messtechnischer Dienst siehe Anhang (Tabelle 7.3 auf den Seiten 104 bis 108)

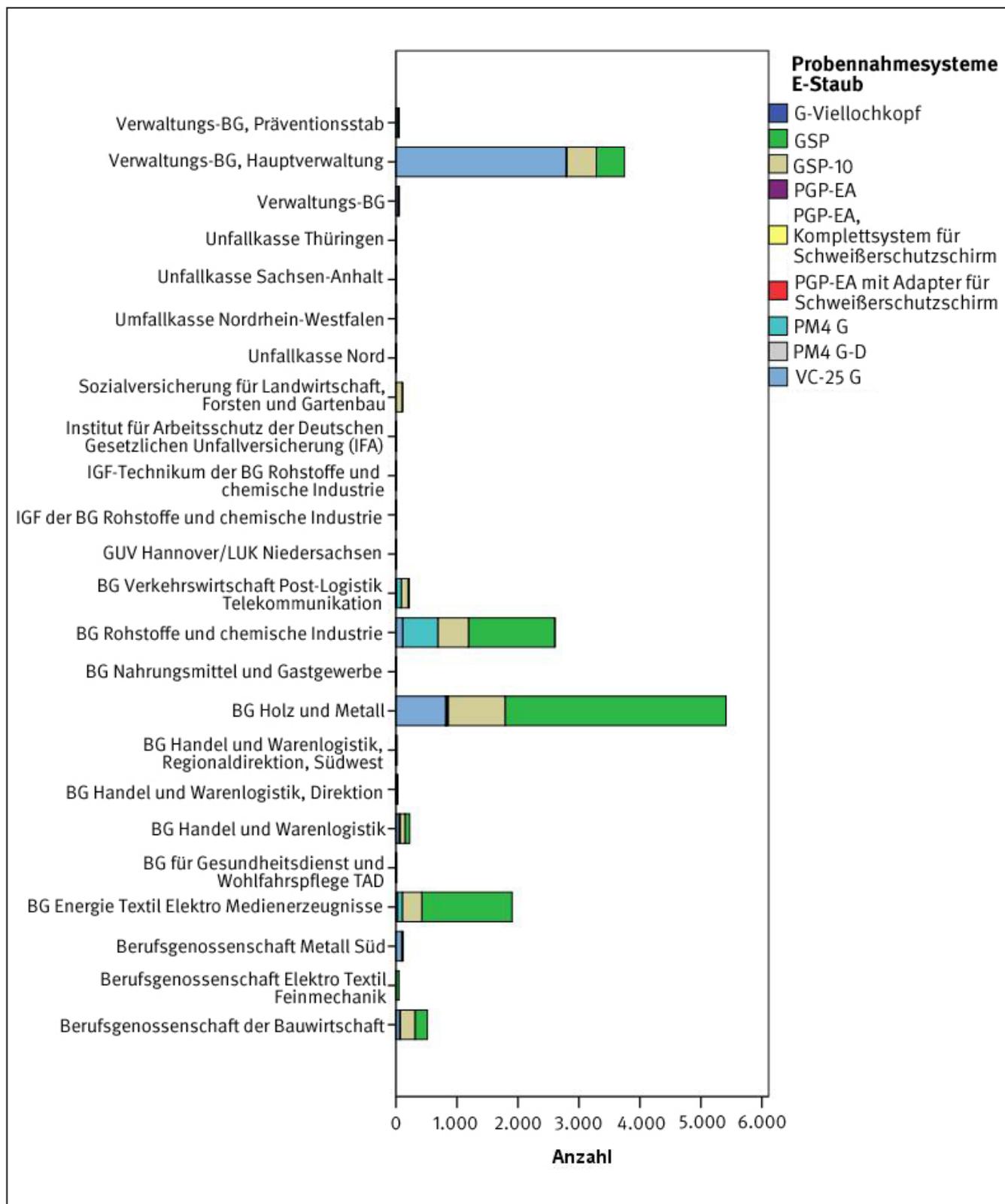
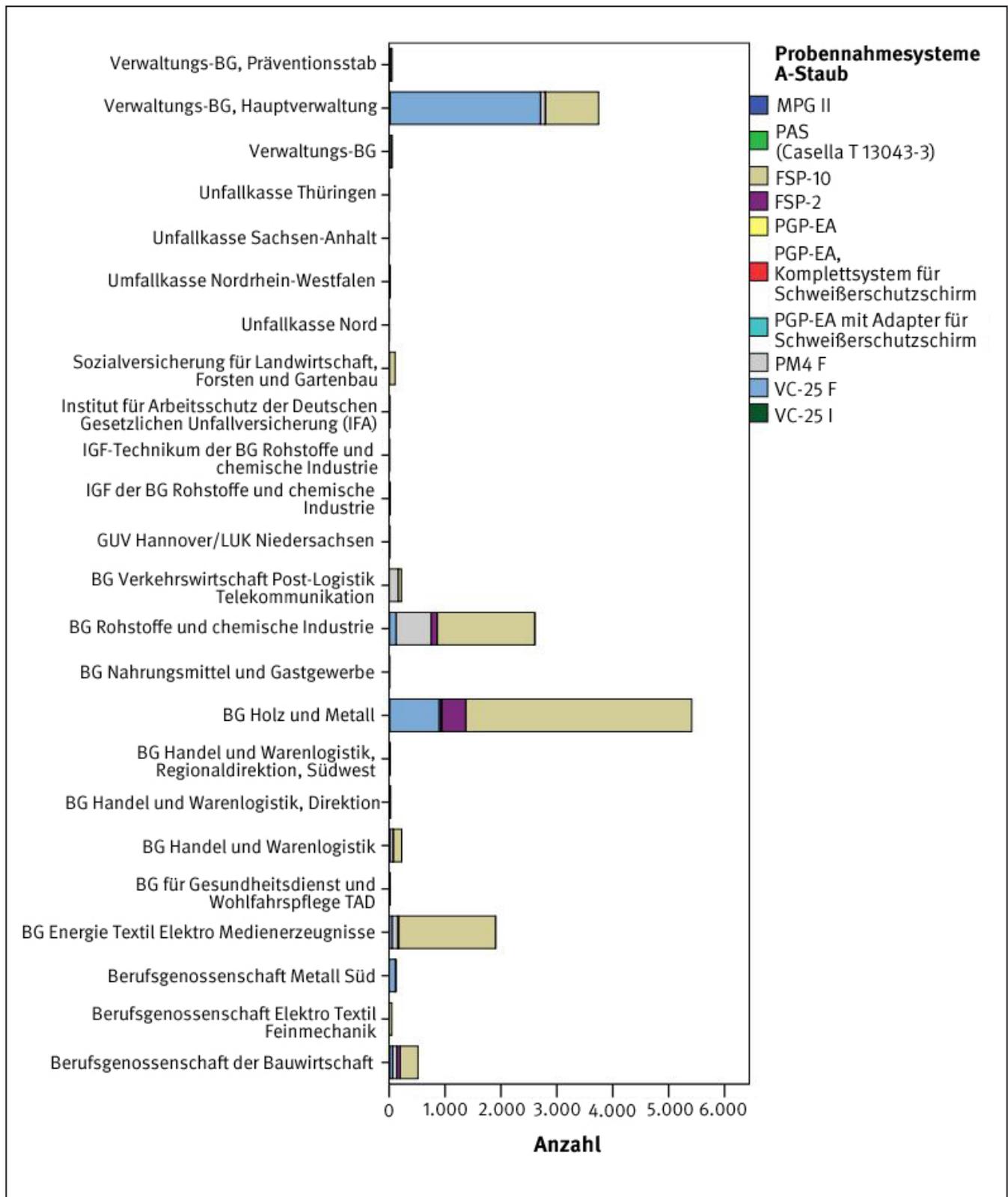


Abbildung 4.16:

Wahl der Probennahmesysteme in Abhängigkeit der Messtechnischen Dienste (A-Staub); Aufschlüsselung der genauen PS-Nutzungszahlen pro Messtechnischer Dienst siehe Anhang (Tabelle 7.4 auf Seite 109)



Probennahmejahr

In diesem Abschnitt werden der zeitliche Verlauf der Messungen und die Konzentrationsverhältnisse c_A / c_E in Abhängigkeit der Probennahmejahre beschrieben. Insgesamt stammen nur 227 Messungen (1,5 % des Gesamtdatensatzes) aus den Jahren 1989 bis 1997. Bis 1998 gehen jährlich ($6 \leq n \leq 57$) Messwertpaare in die Auswertung ein. Ab dem Jahr 1998 ($n = 231$) steigt die jährliche Probenzahl bis in den dreistelligen Bereich an. Die meisten Messwertpaare stammen aus dem Jahr 2014 ($n = 1222$). Es wird überprüft, ob eine Unterteilung der Messjahre sinnvoll ist: Gruppe a (Messungen von 1989 bis 1997) und Gruppe b (Messungen von 1998 bis 2016). Die Mediane des Verhältnisses c_A / c_E sind über die beiden Gruppen hinweg nicht signifikant verschieden ($p = 0,420$; H_0 wird akzeptiert).

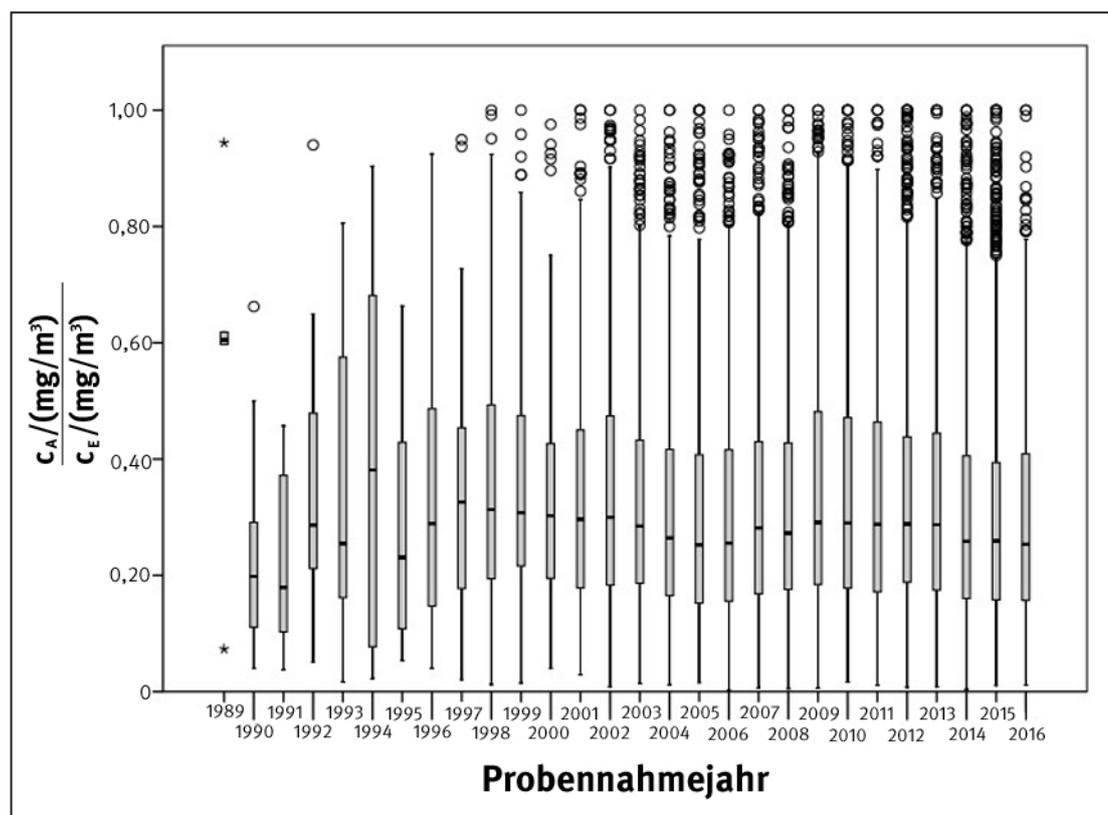
Bei paarweisem Vergleich von c_A / c_E in den einzelnen Jahren der Gruppe b fällt auf, dass sich die Jahre 1998, 2004 bis 2006 und 2014 bis 2016 signifikant von den anderen unterscheiden. Die Mediane von c_A / c_E der Jahre

2004 bis 2006 und 2014 bis 2016 sind im Vergleich zu den anderen Jahren kleiner, während das Jahr 1998 einen vergleichsweise höheren Median als die Jahre 1999 bis 2016 zeigt (Abbildung 4.17). Das Jahr 1989 beinhaltet lediglich sechs Messwertpaare; aus diesem Grund ist eine Boxplot-Darstellung in diesem Jahr nicht möglich. Die Jahre 1991 bis 1994 zeigen einen größeren Interquartilabstand; dies wird ebenfalls durch n beeinflusst, das in diesen Gruppen vergleichsweise klein ist.

Die ersten Datensätze von GSP-10, die in die Auswertung eingehen, stammen aus dem Jahr 2000. Die Mediane von c_A / c_E im Jahr 2000 und den anderen Jahren unterscheiden sich nicht signifikant ($p = 0,120$). Das FSP-10 wird erstmals 1998 in den Analysen berücksichtigt. Der Median von c_A / c_E im Jahr 1998 unterscheidet sich von den anderen Jahren signifikant, wie auch schon zuvor beim paarweisen Vergleich nachgewiesen worden ist ($p = 0,030$). Die Systeme FSP-2, VC-25, GSP und PM4-F stammen aus den Jahren 1989 bis 1997 und können aufgrund der niedrigen Messwertzahl nicht bewertet werden.

Abbildung 4.17:

Boxplot des Verhältnisses c_A / c_E gegen das Probennahmejahr



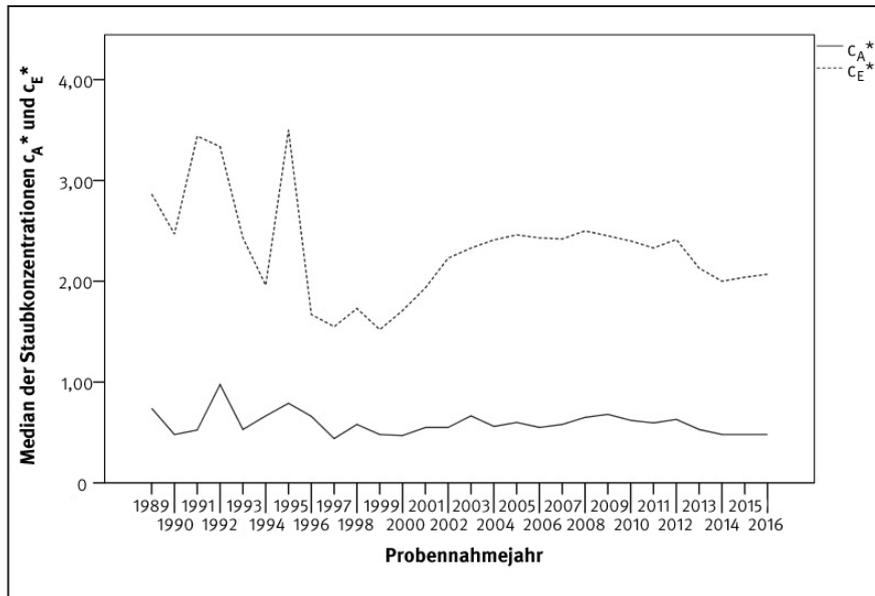
In Abbildung 4.18 auf Seite 66 werden die Mediane der Konzentrationen c_A und c_E gegen die Jahre 1989 bis 2016 abgebildet. In den Jahren 1989 bis 1997 treten starke Schwankungen des Medians bei beiden Konzentrationen auf. Dies lässt sich jedoch wie zuvor mit der geringen Messpaaranzahl während diesem Zeitintervall begrün-

den und demnach fallen vereinzelte Konzentrationen mit höheren Messwerten stärker ins Gewicht als in den Jahren 1998 bis 2016. Der Median der A-Staub-Konzentration bleibt über die Jahre 1998 bis 2016 nahezu konstant und schwankt zwischen $0,47 \text{ mg/m}^3$ im Jahr 2000 und $0,68 \text{ mg/m}^3$ im Jahr 2009. Die Mediane der E-Staub-Konzentra-

tion steigen ab dem Jahr 1999 ($1,52 \text{ mg/m}^3$) bis zum Jahr 2008 bis zum maximal erreichten Konzentrationsmedian

leicht an ($2,50 \text{ mg/m}^3$), um in den darauf folgenden Jahren wieder leicht abzusinken.

Abbildung 4.18:
Verlauf der A- und E-Staub-Konzentrationen gegen die Probennahmejahre



Probennahmeart

Der vorliegende Datensatz lässt sich in Abhängigkeit von der Probennahmeart in zwei Gruppen unterteilen: stationär ($n = 7\,460$; 49,3 % des Gesamtdatensatzes) und personengetragen ($n = 7\,660$; 50,7 % des Gesamtdatensatzes). Zwischen den beiden Gruppen gibt es keine Varianzhomogenität ($p < 0,001$). Die Mediane von c_A / c_E beider Gruppen unterscheiden sich hochsignifikant ($p < 0,001$). Der Median von c_A / c_E beträgt bei stationären Messungen 0,320, bei personengetragenen Messungen dagegen 0,240. Im Mittel werden bei stationären Messungen Konzentrationen von $c_A = 0,70 \text{ mg/m}^3 \pm 0,83 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E = 3,06 \text{ mg/m}^3 \pm 5,65 \text{ mg/m}^3$ gemessen; bei personengetragenen Messungen im Mittel $c_A = 1,18 \text{ mg/m}^3 \pm 1,28 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E = 6,40 \text{ mg/m}^3 \pm 9,63 \text{ mg/m}^3$. Bei den Standardabweichungen handelt es sich um rein rechnerische Werte. Aus physikalischer Sicht können natürlich keine negativen Konzentrationswerte existieren.

In den einzelnen Tätigkeitsgruppen sind ebenfalls ungefähr gleich viele stationäre wie personengetragene Messungen enthalten. Der größte Unterschied in der Anzahl wird in der Gruppe *Umformen* deutlich (stationär: $n = 871$; 64,6 %, personengetragen: $n = 477$; 35,3 %).

4.2 Datenbankauswertung zu den metallischen Inhaltsstoffen

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Paarbildung und der statistischen Tests zu den metallischen Inhaltsstoffen erläutert.

4.2.1 Auswahlkriterien und Bildung von Messwertpaaren

Zunächst werden die Messwertpaare und die berücksichtigten Inhaltsstoffe beschrieben. In die Auswertung werden acht verschiedene Elemente mit ihren Verbindungen einbezogen: Antimon (und seine Verbindungen, außer Sb-H), Barium (und seine Verbindungen), Beryllium (und seine Verbindungen), Blei (und seine Verbindungen), Cadmium (und seine Verbindungen), Kobalt (und seine Verbindungen), Mangan (und seine Verbindungen) sowie Nickel (und seine Verbindungen).

Nach dem Zusammenfügen der Datensätze unter den gleichen Voraussetzungen wie für c_A und c_E und dem Ermitteln der Parallelmessungen von Inhaltsstoff und A-Staub bzw. Inhaltsstoff und E-Staub bleiben für die meisten Elemente nur noch wenige Messwertpaare übrig. Bei dieser Auswertung sind nur Messungen berücksichtigt worden, bei denen vor der Messung die verwendeten Filter gewogen und nach der Messung Wägungen von A- und E-Staub durchgeführt und darüberhinaus Analysen zu den Inhaltsstoffen gemacht worden sind. In vielen Fällen werden Inhaltsstoffmessungen auch ohne gravimetrische Bestimmungen von A- und E-Staub vom belegten Filter durchgeführt. Diese sind in dieser Arbeit nicht berücksichtigt worden.

Nach dem Bilden eines Datensatzes aus parallel gemessenem E-Staub und dem jeweiligen Inhaltsstoff unter den gegebenen Kriterien, erhält man drei Datensätze mit parallel gemessenen Inhaltsstoffen in A- und E-Staub:

- Kobalt (Co) und seine Verbindungen, $n = 57$
- Mangan (Mn) und seine Verbindungen, $n = 111$
- Nickel (Ni) und seine Verbindungen, $n = 126$.

4.2.2 Unterscheidung der Tätigkeitsgruppen

In diesem Abschnitt wird beschrieben, ob eine Unterteilung der drei zuvor genannten Datensätze in Tätigkeits- und Materialgruppen möglich ist.

Unterteilt man die drei Datensätze nach den Tätigkeitsgruppen, die zuvor für A- und E- Staub gebildet worden sind (siehe Abschnitt 4.1.2), können nur noch wenige Gruppen ausgewertet werden. Diese Gruppen sind sehr spezifisch für einzelne Arbeitsbereiche. In Tabelle 4.13 werden die möglichen Kombinationen aus Inhaltsstoff und Tätigkeiten angegeben, die mehr als vier Messwertpaare enthalten.

Die Messwerte der Inhaltsstoffe werden analog zu den Messungen der A- und E-Stäube logarithmisch transformiert. Mit Ausnahme der Messwerte für Ni im E-Staub ($p = 0,021$) sind die Messwerte von Co, Mn und Ni log-normalverteilt. Das gilt auch für die Kombinationsgruppen aus Inhaltsstoff und Tätigkeit.

Die Varianzen des Verhältnisses $c_{A(Mn)} / c_{E(Mn)}$ für die beiden Tätigkeiten sind homogen ($p = 0,429$) und der Median des Verhältnisses $c_{A(Mn)} / c_{E(Mn)}$ der Gruppe *Mangan-Heißverarbeitung* unterscheidet sich hochsignifikant von dem in Gruppe *Mangan-Spanende Bearbeitung*.

Bei Nickel liegt zwischen den Gruppen Heteroskedastizität von $c_{A(Ni)} / c_{E(Ni)}$ vor ($p = 0,030$). Die Mediane von $c_{A(Ni)} / c_{E(Ni)}$ der Gruppen *Nickel-Heißverarbeitung* und *Nickel-Spanende Bearbeitung* unterscheiden sich signifikant voneinander ($p = 0,004$). In allen Gruppen werden ausschließlich metallische Materialien untersucht; aus diesem Grund bringt eine Unterteilung nach Materialgruppen keinen weiteren Informationsgehalt.

Tabelle 4.13:

Kombination aus Inhaltsstoff in A- und E-Staub und der Tätigkeitsgruppe mit angegebener Messpaarzahl

Inhaltsstoff	Tätigkeit	n	Dominierende Arbeitsbereiche
Kobalt (und seine Verbindungen)	<i>Spanende Bearbeitung</i>	36	Trockenschleifen ($n = 17$; 47,2 % der Gruppe) Nassschleifen ($n = 7$; 19,4 % der Gruppe)
	<i>Heißverarbeitung</i>	48	MAG-Schweißen ($n = 15$; 31,2 % der Gruppe)
Mangan (und seine Verbindungen)	<i>Spanende Bearbeitung</i>	52	Trockenschleifen ($n = 37$; 72,5 % der Gruppe)
	<i>Heißverarbeitung</i>	46	MAG-Schweißen ($n = 12$; 26,1 % der Gruppe)
Nickel (und seine Verbindungen)	<i>Spanende Bearbeitung</i>	61	Trockenschleifen ($n = 46$; 75,4 % der Gruppe)

4.2.3 Lineare Regressionsanalyse

Die Ergebnisse zur Überprüfung der Voraussetzungen zur linearen Regression werden in Tabelle 4.1 auf Seite 41 dargestellt. Analog zu A- und E-Staub werden mit der linearen Regressionsanalyse für die Inhaltsstoffgruppen Regressionskoeffizienten ermittelt sowie das Gütemaß des Modells in jeder Gruppe (Tabelle 4.14). Die zugehörigen Streudiagramme mit Realmesswerten, Umrechnungsfunktionen und 95%-Konfidenzintervallen sind dem Anhang (Abbildungen 7.26 bis 7.28 auf den Seiten 99 bis 100) zu entnehmen. Das höchste korrigierte Bestimmtheitsmaß der Inhaltsstoffe wird für Kobalt erreicht ($adj.R^2 = 0,889$), jedoch setzt sich diese Gruppe nur aus 57 Messwertpaaren zusammen. Die Regressionskoeffizienten der drei Gruppen sind stark unterschiedlich. Sowohl Nickel als auch Mangan werden von den Arbeitsbereichen MAG-

Schweißen (Ni: 9,5 % bzw. Mn: 13,5 % der Messwertpaare in der Gruppe) und Trockenschleifen (Ni: 36,5 % bzw. Mn: 33,3 % der Messwertpaare in der Gruppe) dominiert. C_0 für Nickel liegt bei -3,351, während bei Mangan -1,738 berechnet wird. Auch der Unterschied von k beider Gruppen ist $>0,2$.

Betrachtet man die Unterteilung der drei Inhaltsstoffgruppen nach den Tätigkeitsgruppen, so wird das höchste Gütemaß für die Kombinationsgruppe *Mn-Spanende Bearbeitung* erreicht ($adj.R^2 = 0,875$). Obwohl sich das Bestimmtheitsmaß und der Korrelationskoeffizient von *Co-Spanende Bearbeitung* und *Mn-Spanende Bearbeitung* nur marginal unterscheiden, zeigen sie doch grundlegend verschiedene Regressionskoeffizienten. Prinzipiell werden bei *Spanende Bearbeitung* kleinere Exponenten für Gl. (3.4) ermittelt als bei *Heißverarbeitung*.

Tabelle 4.14:

Aufstellung der Regressionsparameter der Inhaltsstoffe, Anzahl (n), Korrelationskoeffizient (R), korrigiertes Bestimmtheitsmaß ($adj. R^2$), Regressionskoeffizienten C_0 und k , s_{Fit} und die Umrechnungsfunktion; Streudiagramme im Anhang auf den Seiten 87 bis 100

Gruppe	n	R	$adj. R^2$	C_0	k	$s_{Fit}(\ln(c_A))$	Umrechnungsfunktion
Inhaltsstoffe							
Kobalt	57	0,889	0,787	$-3,168 \pm 0,257$	$0,727 \pm 0,050$	0,3064 bis 0,8702	$c_{A(Ko)}^* = (c_{E(Ko)}^*)^{0,727} \times e^{-3,168}$
Mangan	111	0,815	0,665	$-1,738 \pm 0,240$	$0,836 \pm 0,057$	0,1438 bis 0,4266	$c_{A(Mn)}^* = (c_{E(Mn)}^*)^{0,836} \times e^{-1,738}$
Nickel	126	0,842	0,706	$-3,351 \pm 0,163$	$0,630 \pm 0,036$	0,1895 bis 0,5401	$c_{A(Ni)}^* = (c_{E(Ni)}^*)^{0,630} \times e^{-3,351}$
Kombination Inhaltsstoff-Tätigkeit							
Kobalt-Spanende Bearbeitung	36	0,935	0,874	$-3,364 \pm 0,236$	$0,693 \pm 0,045$	0,4032 bis 1,0880	$c_{A(Ko)}^* = (c_{E(Ko)}^*)^{0,693} \times e^{-3,364}$
Mangan- Heißverarbeitung	48	0,937	0,875	$-0,714 \pm 0,217$	$0,976 \pm 0,053$	0,2242 bis 0,7594	$c_{A(Mn)}^* = (c_{E(Mn)}^*)^{0,967} \times e^{-0,714}$
Mangan-Spanende Bearbeitung	52	0,718	0,506	$-1,176 \pm 0,031$	$0,614 \pm 0,023$	0,2175 bis 0,4757	$c_{A(Mn)}^* = (c_{E(Mn)}^*)^{0,614} \times e^{-1,176}$
Nickel- Heißverarbeitung	46	0,810	0,648	$-2,825 \pm 0,430$	$0,721 \pm 0,079$	0,2044 bis 0,7158	$c_{A(Ni)}^* = (c_{E(Ni)}^*)^{0,721} \times e^{-2,825}$
Nickel-Spanende Bearbeitung	61	0,839	0,699	$-3,292 \pm 0,186$	$0,612 \pm 0,052$	0,2626 bis 0,8972	$c_{A(Ni)}^* = (c_{E(Ni)}^*)^{0,612} \times e^{-3,292}$

Bei der Betrachtung des Streudiagramms von *Mn-Heißverarbeitung* fällt ein Messwertpaar besonders auf: $(c_{E(Mn)} | c_{A(Mn)}) = (1,30 | 0,25)$ (Abbildung 4.19). Der Wert zeigt bei dieser Tätigkeit die größte Cook'sche Distanz ($C_i = 0,316$). Wird dieser Wert bei der linearen Regression nicht berücksichtigt, ändern sich die Regressionskoeffizienten ($\Delta C_0 = 0,172$, $\Delta k = 0,039$), während die Gütemaße nahezu konstant bleiben ($\Delta adj. R^2 = 0,002$, $\Delta R = 0$).

Dieses Messwertpaar beschreibt einen Anteil von 7,3 % im E- bzw. 6,1 % im A-Staub. Die Messung hat an einem (MAG-)Schweißarbeitsplatz statt gefunden, in dessen unmittelbarer Umgebung ebenfalls Schleifstäube produziert worden sind. Aus diesem Grund könnten die gemessenen Partikeln auch aus der Tätigkeit *Schleifen* herrühren und nicht ausschließlich vom Schweißen.

Abbildung 4.20 zeigt die Konzentrationsmesswertpaare von Nickel in A- bzw. E-Staub. Auch bei Nickel gibt es zwei Messwertpaare, die ein höheres Cook'sches Distanzmaß aufweisen und sich von der normalen Streuung der Messwertpaare abheben: $(c_{E(Ni)} | c_{A(Ni)}) = (4,70 | 0,025)$ mit $C_i = 0,160$ und $(c_{E(Ni)} | c_{A(Ni)}) = (0,77 | 0,19)$ mit $C_i = 0,118$.

Der Nickelgehalt des letzteren Messwertpaars liegt außerdem bei 51,0 % im E-Staub bzw. 51,4 % im A-Staub. Dieser Gehalt resultiert aus der durchgeführten Tätigkeit: Schleifen und Polieren von Nickelschalen per Hand.

Werden beide Messwertpaare von der linearen Regressionsanalyse ausgeschlossen, verändern sich Regressionskoeffizienten nur marginal und die Gütemaße verbessern sich leicht ($\Delta C_0 = 0,009$, $\Delta k = 0,005$; $adj. R^2 = 0,705$ vs. $0,699$ (mit Hebelwerten) bzw. $R = 0,843$ vs. $0,839$ (mit Hebelwerten)).

Auch bei *Kobalt-Spanende Bearbeitung* lässt sich ein Hebelwert erkennen, selbst wenn die Cook'sche Distanz rechnerisch < 1 ist (Abbildung 4.21 auf Seite 70). Das Messwertpaar $(c_{E(Co)} | c_{A(Co)}) = (0,95 | 0,098)$ zeigt eine höhere Kobaltkonzentration im E-Staub als die anderen Messwertpaare. Wird dieses Messwertpaar bei der linearen Regressionsanalyse nicht berücksichtigt, ergeben sich Unterschiede in den Regressionskoeffizienten und den Gütemaßen ($\Delta C_0 = 0,164$, $\Delta k = 0,028$; $adj. R^2 = 0,859$ vs. $0,870$ (mit Hebelwerten) bzw. $R = 0,929$ vs. $0,935$ (mit Hebelwerten)). Der Hebelwert weist einen Co-Gehalt von 18,3 % im A-Staub bzw. 6,8 % im E-Staub auf. Dies lässt sich ebenfalls auf die durchgeführte Tätigkeit zurückführen: Unterlagen sind mit Stahlwolle abgerieben und vom resultierenden Metallpulver (hauptsächlich Wolframcarbide 85 % Wo, aber auch 15 % Co) mit einem Handfeger gereinigt worden.

Die Umrechnungsfunktionen aller Gruppen weisen ein breites 95%-Konfidenzintervall auf (siehe s_{Fit} in Tabelle 4.14); dies lässt sich auf die geringe Anzahl an Messpaaren zurück führen.

Abbildung 4.19:
Regressionsfunktionen der Tätigkeitsgruppen *Heißverarbeitung* und *Spanende Bearbeitung* für Mangan

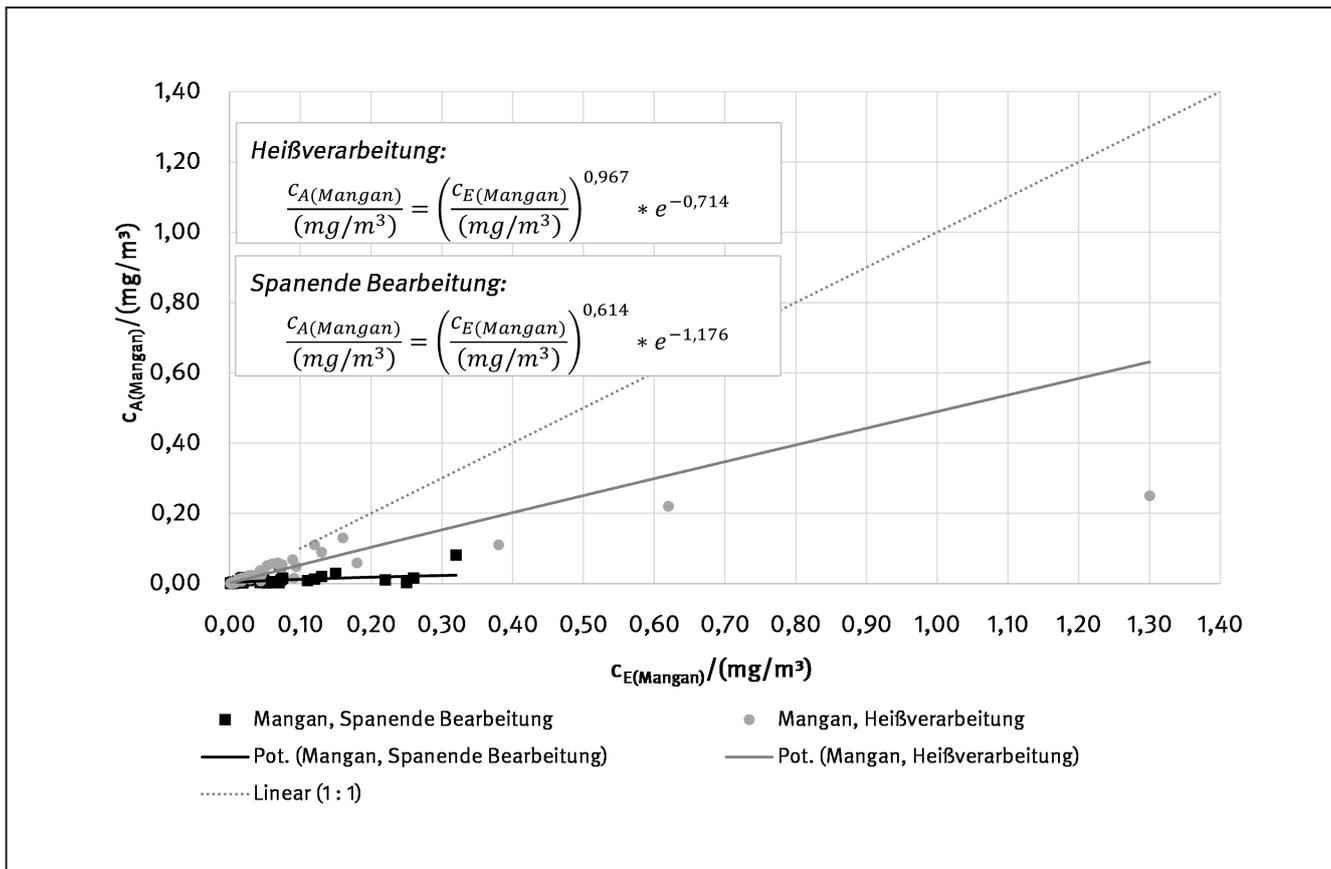


Abbildung 4.20:
Nickelkonzentration in A- und E-Staub für die Tätigkeitsgruppen *Spanende Bearbeitung* und *Heißverarbeitung*

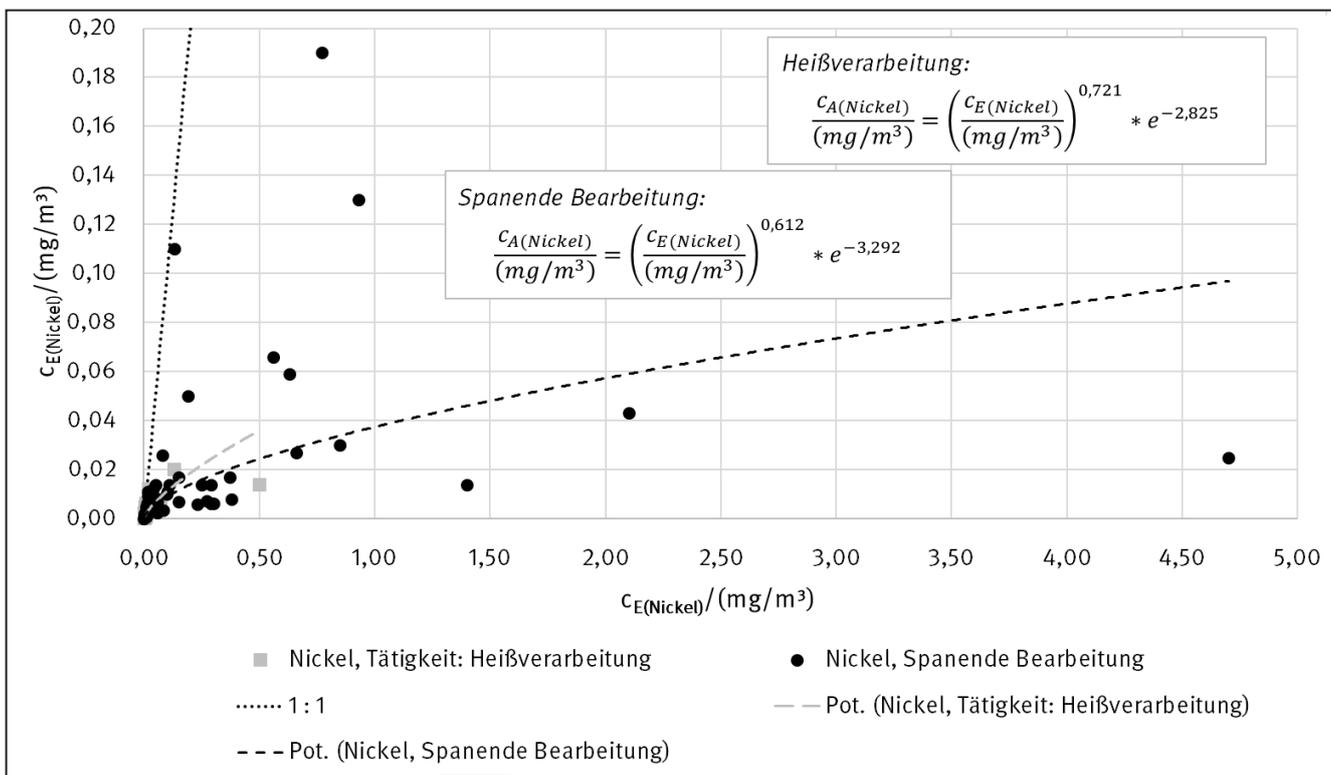
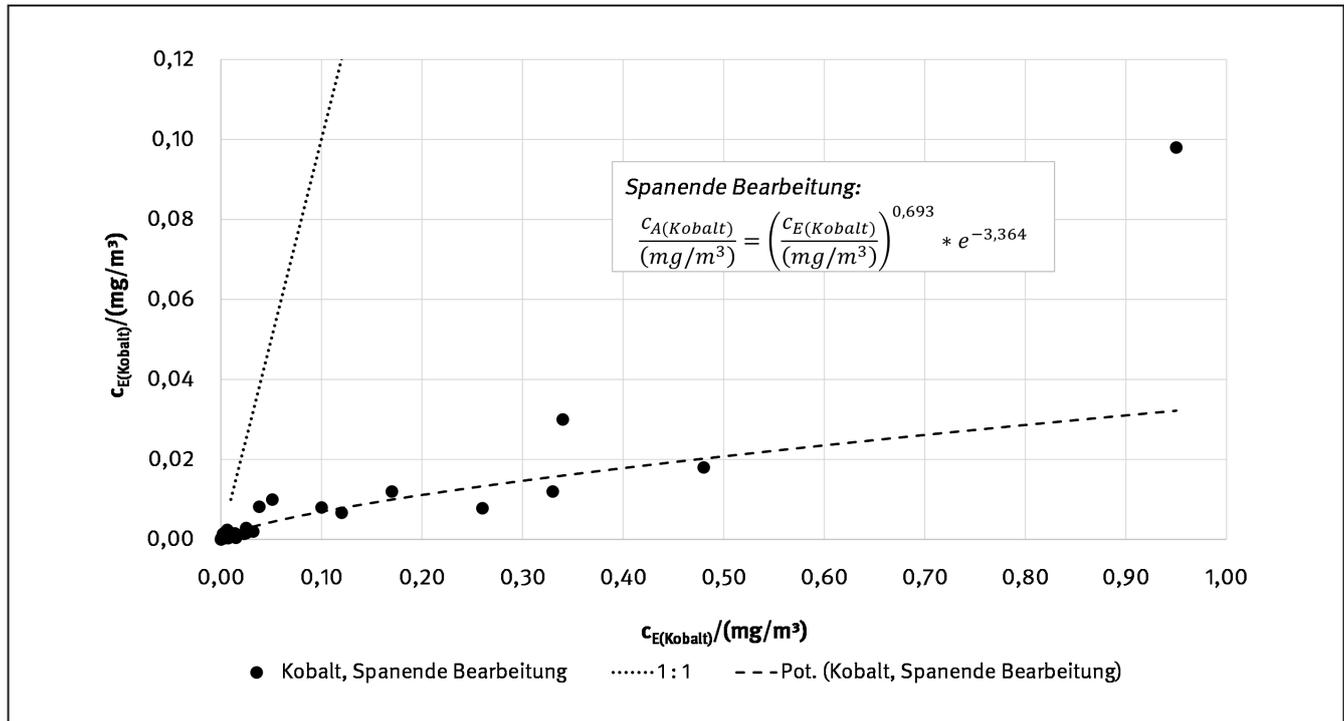


Abbildung 4.21:
Kobaltkonzentration in A- und E-Staub für die Tätigkeitsgruppe Spanende Bearbeitung



4.3 Partikelgrößenverteilungen der Umrechnungsfunktionen

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen zeigen bisher, dass der Zusammenhang zwischen alveolengängigem und einatembarem Staub mit Potenzfunktionen (Gl. (3.4)) beschrieben werden kann. Dies bedeutet, dass sich die Partikelgrößenverteilung aller Schwebstoffe in der Luft im Wertebereich der Potenzfunktionen ändern muss. Daher wird in diesem Abschnitt untersucht, welche Partikelgrößenverteilungen mit den bis jetzt bestimmten Potenzfunktionen im Einklang sind.

4.3.1 Das Verhältnis aus A- und E-Staub für ausgewählte Partikelgrößenverteilungen

In DIN EN 13205-2 werden relevante Partikelgrößenverteilungen für A- und E-Staub aufgelistet [36]. So werden Verteilungen mit einem massebezogenen medianen aerodynamischen Durchmesser (*MMAD*) zwischen 1 und 30 μm (ganzzahlige Angabe) sowie *GSD* zwischen 1,75 und 4,00 (mit einer Schrittweite von 0,25) für die Berechnungen von $q_3(D)$ berücksichtigt [36].

Abbildung 4.22 zeigt exemplarisch eine Verteilung mit einem *MMAD* von 15 μm und einer *GSD* von 3,00 (graue Linien). Im Diagramm werden ebenfalls die Trennkurven nach DIN 481 angezeigt (schwarze Linien).

Für jede Kombination aus *MMAD* und *GSD*, die in der Norm vorgegeben ist, kann nach c_A / c_E das Verhältnis aus A- und E-Staub berechnet werden. In Abbildung 4.23 wird deutlich, dass bei kleinen *MMAD* und *GSD* die Partikelgrößenverteilung vollständig in dem Bereich liegt, in dem die Trennkurve $E > A$ große Werte annimmt (siehe auch Abbildung 3.4). Somit bestehen die gesamten Schwebstoffe in der Luft fast vollständig aus A-Staub und das Verhältnis ist erwartungsgemäß nahe an 1. Bei großen *MMAD* und kleinen *GSD* liegen Verteilungskurven in einem Bereich, in dem die Trennkurve $E > A$ sehr kleine Werte annimmt. Somit wird vom E-Staub kaum A-Staub abgetrennt und das Verhältnis geht gegen null. Dieser Übergang von $c_A / c_E = 1$ zu $c_A / c_E = 0$ mit zunehmendem *MMAD* ist bei allen *GSD* zu beobachten, die hier untersucht worden sind. Das heißt, dass bei den Partikelgrößenverteilungen, die nach DIN EN 13205-2 an Arbeitsplätzen zu erwarten sind, das Verhältnis c_A hauptsächlich vom *MMAD* bestimmt wird.

Abbildung 4.22:

Exemplarische Verteilung mit $MMAD = 15 \mu\text{m}$ und $GSD = 3,00$ (graue Linie) und Trennkurven (schwarze Linien) nach DIN 481 (x-Achse in logarithmischer Skalierung)

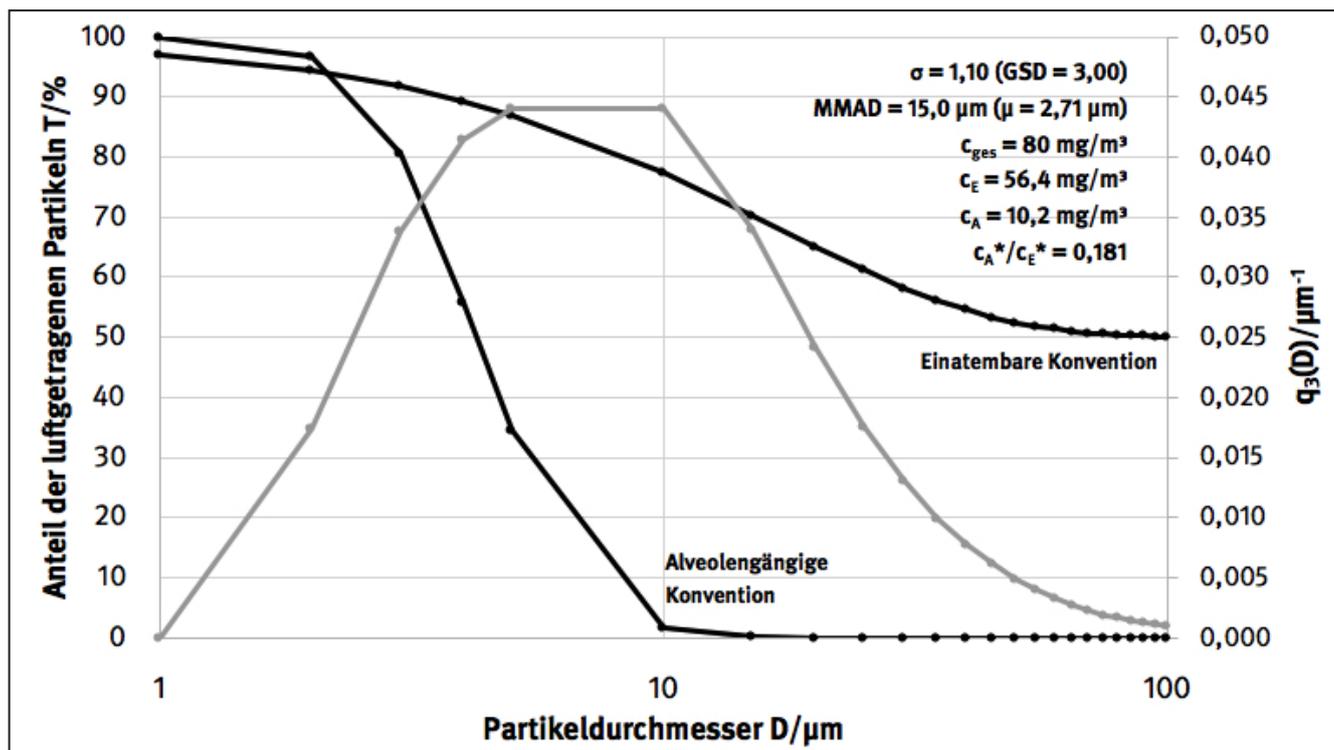
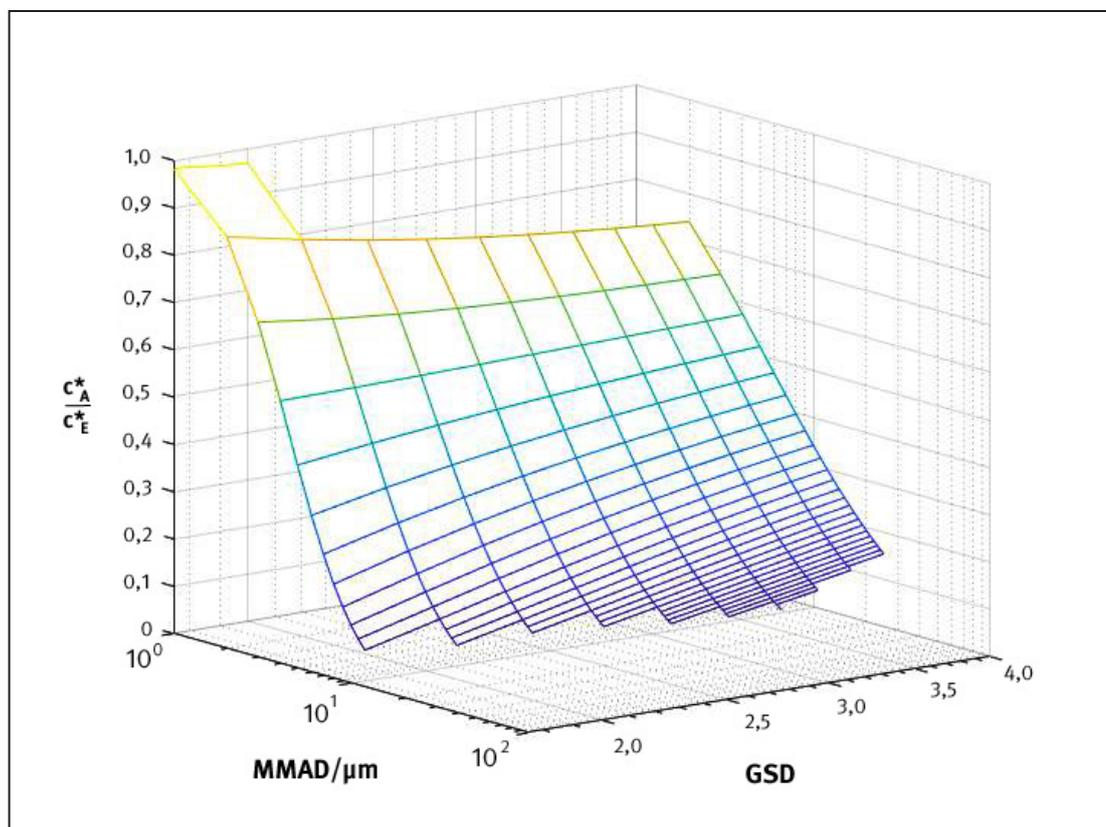


Abbildung 4.23:

Dreidimensionale Darstellung interessierender Partikelgrößenverteilungen bei lognormalverteilter Massendichte

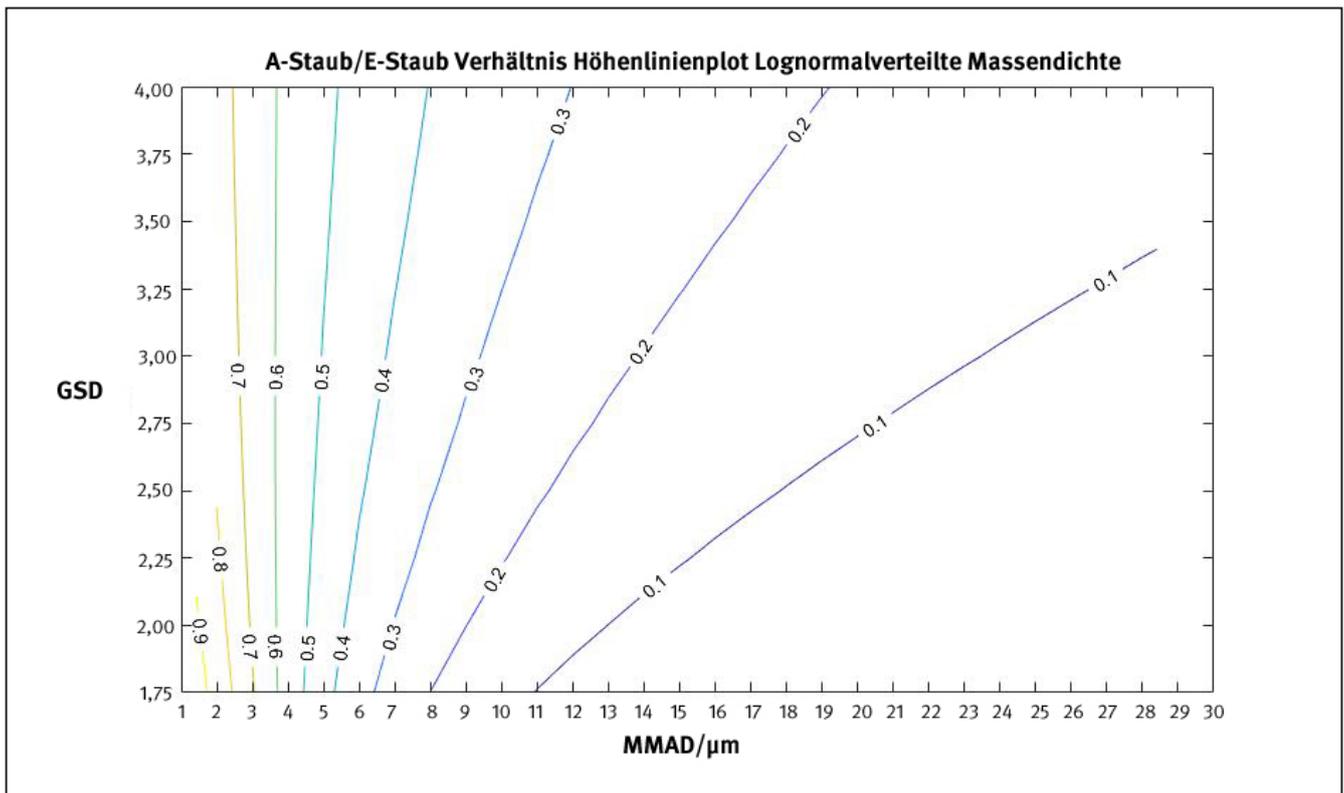


Dies wird auch in Abbildung 4.24 deutlich, in der die Verhältnisse c_A / c_E als Höhenlinien dargestellt sind. Die Höhenlinien 0,9 bis 0,5 verlaufen nahezu parallel zur y-Achse. Für diese ist $MMAD < 5 \mu m$ und damit im Bereich des Punktes $MMAD = 4,25 \mu m$, an dem die Trennkurve $E > A$ 50 % des A-Staub abtrennt. Erst wenn der $MMAD$ über diesen Bereich hinaus ansteigt, wird auch der Einfluss der GSD sichtbar: Wenn ein $MMAD > 5 \mu m$ vorliegt,

wird mit steigender GSD das Verhältnis c_A / c_E erhöht, da im Verhältnis mehr Teilchen mit kleinen Durchmessern erfasst werden. Dies erklärt auch die Steigungen der Höhenlinien $< 0,5$. Dieser Effekt ist aber deutlich schwächer als der des $MMAD$, denn auch mit steigendem GSD (bei $MMAD > 5 \mu m$) kann das Verhältnis c_A / c_E nicht auf 0,5 oder darüber angehoben werden.

Abbildung 4.24:

Höhenliniendiagramm der interessierenden Partikelgrößenverteilungen bei lognormalverteilter Massendichte; GSD vs. $MMAD$



4.3.2 Bestimmen möglicher Partikelgrößenverteilungen in heuristischen Gruppen

Zur Bestimmung möglicher Partikelgrößenverteilungen werden zunächst die Funktionen aus Tabelle 4.6 heran-

gezogen. Setzt man für die Funktionswerte jeweils den kleinsten und größten c_E -Wert einer Gruppe ein (Gl. (4.2) und (4.3)), kann man dementsprechend das kleinste und größte Verhältnis c_A für diese Gruppen bestimmen (Abbildung 4.25).

$$\frac{\hat{c}_{A_{c_E(\min)}}}{\text{mg/m}^3} = \left(\frac{c_E(\min)}{\text{mg/m}^3} \right)^k * e^{C_0} \quad | : \left(\frac{c_E(\min)}{\text{mg/m}^3} \right) \Leftrightarrow \frac{\hat{c}_{A_{c_E(\min)}}}{c_E(\min)} = \left(\frac{c_E(\min)}{\text{mg/m}^3} \right)^{k-1} * e^{C_0} \quad (4.2)$$

$$\frac{\hat{c}_{A_{c_E(\max)}}}{\text{mg/m}^3} = \left(\frac{c_E(\max)}{\text{mg/m}^3} \right)^k * e^{C_0} \quad | : \left(\frac{c_E(\max)}{\text{mg/m}^3} \right) \Leftrightarrow \frac{\hat{c}_{A_{c_E(\max)}}}{c_E(\max)} = \left(\frac{c_E(\max)}{\text{mg/m}^3} \right)^{k-1} * e^{C_0} \quad (4.3)$$

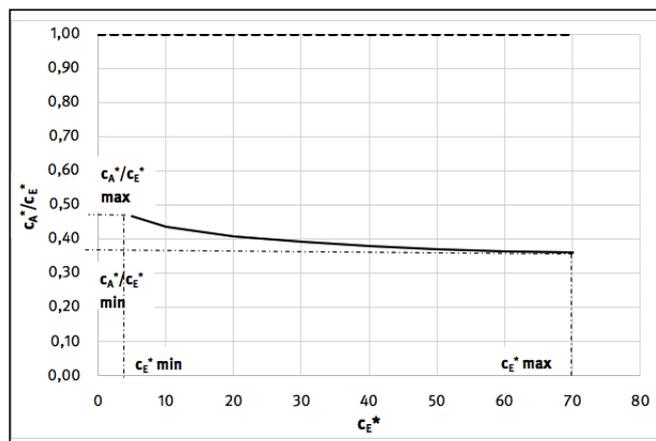
In Abbildung 4.25 wird die Abhängigkeit des Verhältnisses c_A / c_E von $c_{E(\min)}$ bzw. $c_{E(\max)}$ verdeutlicht. Da die heuristischen Gruppen durch die großen Bestimmtheitsmaße ausgezeichnet sind und diese Gruppen das Kernstück dieser Arbeit sind, wird diese Analyse auch nur für die heuristischen Gruppen vorgenommen.

Zur Bestimmung der maximal und minimal möglichen Konzentrationsverhältnisse müssen die niedrigsten bzw. höchsten E-Staub-Messwerte in die Gl. (4.2) und (4.3) eingesetzt werden. Diese Konzentrationsmesswerte führen zu den Ergebnissen in Tabelle 4.15 und können der Tabelle 7.5 auf Seite 114 im Anhang entnommen werden.

Beispielsweise liegen für die Gruppe *Löten* Verhältnisse zwischen $0,49 < c_A / c_E < 0,62$ (Tabelle 4.15) vor.

Abbildung 4.25:

Beispielskizze zur Abhängigkeit des Verhältnisses c_A / c_E von c_E ; in dieser Skizze gilt: $k = 0,9$ und $C_0 = -0,6$



Diese Verhältnisse entsprechen einem Bereich im Höhenliniendiagramm, der in Abbildung 4.26 rot hinterlegt ist. Damit sind mehrere Partikelgrößenverteilungen möglich, die zu den Konzentrationen der Funktion in Tabelle 4.6 führen können. Aus den Höhenlinien wird aber deutlich, dass sich im Bereich der kleinsten bis zur größten gemessenen E-Staub-Konzentration der *MMAD* von ca. 4 μm auf ca. 5 μm erhöhen muss und dass andere *MMAD* in dieser Gruppe unwahrscheinlich sind.

Die Gruppe *Strahlen* beschreibt einen Konzentrationsverhältnissbereich zwischen 0,11 und 0,45. Damit muss sich im Bereich von $c_{E(\min)}$ bis $c_{E(\max)}$ der *MMAD* von ca. 5 μm auf

30 μm erhöhen (siehe blauer Bereich in Abbildung 4.26). Somit beschreibt diese Gruppe einen anderen *MMAD*-Bereich. In anderen Gruppen passen fast alle in DIN EN 13205-2 beschriebenen Partikelgrößenverteilungen zu den berechneten Konzentrationsverhältnissen, beispielsweise für die Gruppe *Schleifen (mineralisch)* oder *Walzen* (siehe Tabelle 4.15).

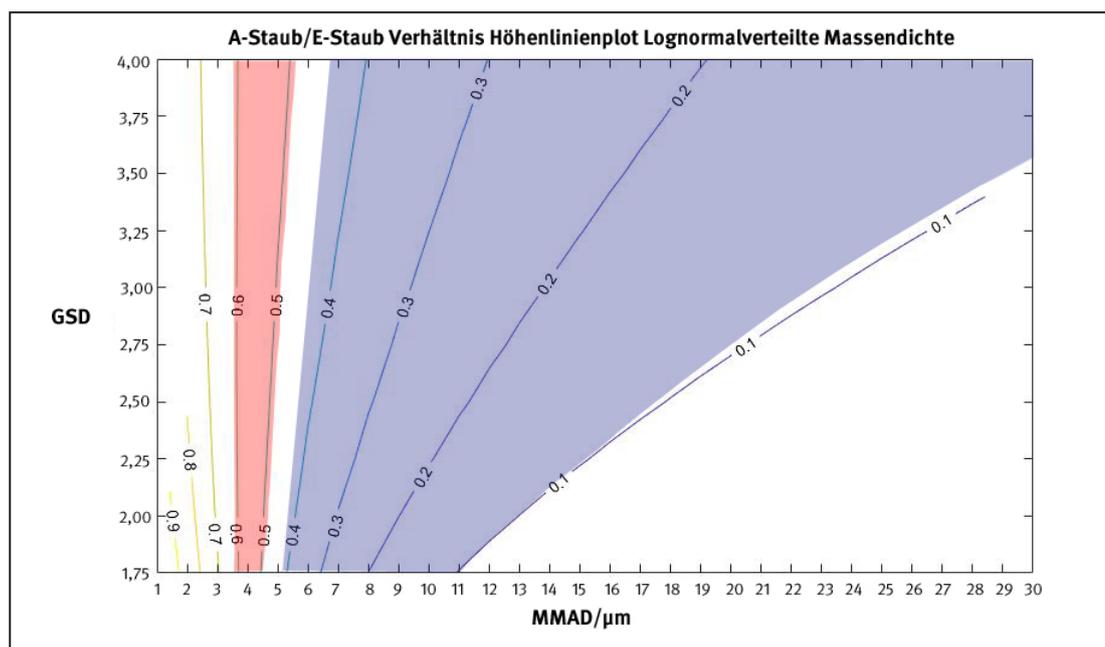
Tabelle 4.15:

Minimal und maximal mögliche Konzentrationsverhältnisse in jeder heuristischen Gruppe

Gruppe	$\frac{\hat{c}_{AcE(\min)}}{cE(\min)}$	$\frac{\hat{c}_{AcE(\max)}}{cE(\max)}$
<i>Löten</i>	0,62	0,49
<i>Gießen (Metall)</i>	0,74	0,54
<i>Schweißen</i>	0,88	0,27
<i>Sägen (mineralisch)</i>	0,54	0,17
<i>Hochtemperaturschneiden</i>	0,92	0,17
<i>Schleifen (mineralisch)</i>	0,58	0,13
<i>Walzen</i>	0,72	0,21
<i>Strahlen</i>	0,45	0,11
<i>Meißeln, Bossieren, Stemmen</i>	0,39	0,07
<i>Drahtziehen</i>	0,60	0,10
<i>Wiegen (mineralisch)</i>	0,56	0,09

Abbildung 4.26:

Höhenliniendiagramm mit grafischer Darstellung von Partikelgrößenverteilungen, die zur Umrechnungsfunktion von *Löten* (rot hinterlegter Bereich) und *Strahlen* (blau hinterlegter Bereich) passen



5 Diskussion

5.1 Bewertung des Gesamtdatensatzes

Zur Bestimmung von möglichen Umrechnungsfunktionen liegt den Auswertungen dieser Arbeit ein ausreichend großer Datensatz von 15 120 Messwertpaaren zugrunde. Es werden zu den Analysen nur Messungen zu A- und E-Staub und Inhaltsstoffen in A- und E-Staub herangezogen; Holzstaub und Schweißrauche werden darüber hinaus nicht berücksichtigt.

Die logarithmierten Messwerte beider Staubkonzentrationen zeigen keine Normalverteilung. Da die Daten durch Messungen im Zusammenhang mit vielen unterschiedlichen Prozessen generiert worden sind und darüber hinaus auch von unterschiedlichen Materialgruppen stammen, setzt sich der Gesamtdatensatz aus vielen einzelnen Verteilungen zusammen und lässt sich damit nicht mit einer einzelnen Verteilung beschreiben. Während die Histogramme annähernd eine (Log-)Normalverteilung zeigen, beschreiben die Tests ein hochsignifikantes Ergebnis, diese Verteilungsannahme zu verwerfen. Dies lässt sich zusätzlich durch die große Anzahl an Messwertpaaren begründen. Bei einer hohen Messwertzahl resultiert meistens ein signifikantes Ergebnis, obwohl der beobachtete Effekt nur sehr klein ist (Trugschluss der großen Messwertzahlen [97]).

Das Kriterium $c_A \leq 10 \text{ mg/m}^3$ bzw. $c_E \leq 100 \text{ mg/m}^3$ fällt bei der Darstellung der Messwertpaare im Streudiagramm durch einen Schnitt auf, der die Messwertpaare begrenzt (siehe Abbildung 4.3 auf Seite 50). Wenn die fehlenden Messwertpaare ($n = 119$) in das Modell mit einbezogen werden, ändern sich die Regressionskoeffizienten nur marginal ($\Delta k = 0,007$; $\Delta C_o = 0,001$). Das Modell kann damit als robust gegenüber den Werten betrachtet werden, die durch das Selektionskriterium ausgeschlossen worden sind.

5.2 Gruppenbildung

Einatembare Staub ist die wichtigste Prädiktorvariable für das Modell der linearen Regression. Nur durch diese Variable werden bereits 58,5 % der Variation des A-Staubes erklärt. Zur weiteren Beschreibung und Verbesserung des Modells werden nacheinander die Variablen *Tätigkeit* und *Material* ausgewählt.

Aus dem Gesamtdatensatz werden sechs Tätigkeitsgruppen gebildet, die jeweils über eine hohe Anzahl an Messwertpaaren verfügen. Dies erlaubt eine zuverlässige statistische Auswertung. Die Zuordnung zu den einzelnen Gruppen erfolgt auf der Basis der in der MEGA-Datenbank hinterlegten Arbeitsbereichsbezeichnungen. Die Zuordnung des beprobten Arbeitsplatzes zu einem AB wird

von geschulten, sogenannten autorisierten Mitarbeitern der Messtechnischen Dienste zur Messung getroffen. Da Tätigkeiten aber nicht immer eindeutig voneinander abgegrenzt werden können, ist nicht auszuschließen, dass in manchen Fällen die Zuordnung nicht korrekt erfolgt ist. So ist beispielsweise eine Pflichtangabe an Schweißarbeitsplätzen, ob der Anteil der Schleifarbeiten weniger oder mehr als 5 % beträgt. Die autorisierten Mitarbeiter geben darüber hinaus häufig in der Bemerkung zum IBA an, ob zusätzlich zum angegebenen AB weitere Tätigkeiten während der Messung ausgeführt worden sind. Solche Bemerkungen als Datensatzbestandteil sind bei der Auswertung praktisch jedoch kaum zu berücksichtigen und in dieser Arbeit nur bei der Gruppenbildung zum Energieeintrag mit einbezogen worden.

Die Tätigkeitsgruppen sind somit aufgrund inhaltlicher Aspekte gebildet worden. Aus statistischer Sicht unterscheidet sich nur die Gruppe *Heißverarbeitung* von den anderen Gruppen. Diese Gruppe zeigt im Vergleich auch das höchste Bestimmtheitsmaß ($adj.R^2 = 0,668$). Von einer weiteren Zusammenfassung der anderen Tätigkeitsgruppen wird abgesehen, obwohl sich ihre Regressionskoeffizienten kaum unterscheiden ($\Delta C_{o,max} = 0,069$, $\Delta k_{max} = 0,093$). Aus inhaltlicher Sicht und zur weiteren Unterteilung der Gruppen nach dem Material ist diese Tätigkeitsgruppierung jedoch sinnvoll.

Es ist in dieser Arbeit nicht möglich gewesen, die Tätigkeitsgruppen systematisch weiter zu untergliedern. Die DIN 8580 hat Anhaltspunkte für die Bildung weiterer Gruppen gegeben, doch eine Untergliederung nach den enthaltenen Vorgaben ist aufgrund von statistischen und inhaltlichen Gründen sowie teilweise zu niedrigen Messwertanzahlen nicht möglich (z. B. *Abtragen* $n = 14$, *Reparatur* $n = 29$).

Eine Unterteilung nach dem Energieeintrag in das Material ist ebenfalls nicht möglich, da die betrachteten Gruppen mit hohem Energieeintrag nicht zu einer Untergruppe zusammengeschlossen werden können und sich das Konzentrationsverhältnis der Einzelgruppen nicht von *Spanende Bearbeitung* unterscheidet bzw. keine neuen Informationen liefert.

Innerhalb der Gruppe *Spanende Bearbeitung* wäre es denkbar, Gruppen anhand der verwendeten Maschinen zu unterscheiden (z. B. Schleifen: Winkel-, Schwing-, Band- oder Trennschleifer). Beim Schleifen per Hand könnte dann eine Unterteilung nach der Körnung des Schleifpapiers gewählt werden oder beim Sägen durch die Einteilung in die verwendeten Sägeblätter (Zahnhöhe, Zahnteilung). Abhängig von der Wahl dieser Werkzeuge werden unterschiedlich große Partikeln produziert, die

variierende Größenverhältnisse in der betrachteten Tätigkeitsgruppe verursachen können.

Ebenfalls interessant wäre eine Information, ob bei der spanenden Bearbeitung ein Kühlschmierstoff verwendet worden ist. Die Nutzung eines solchen Stoffs könnte beispielsweise Einfluss auf die Größe und die Menge von Partikeln beim Materialabtrag nehmen [98; 99]. Jedoch sind weder Informationen über die Werkzeuge noch über die Kühlschmierstoffe Pflichtangaben in der Datenbank und können aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Zwei fachkundige Personen haben unabhängig voneinander die einzelnen Messwertpaare aus dem Gesamtdatensatz den unterschiedlichen Materialgruppen zugeordnet. Die Ergebnisse sind dann verglichen und bei Unstimmigkeiten diskutiert worden.

Bei einem Messwertpaar können oft mehrere Materialbezeichnungen angegeben werden, wie beispielsweise „Metallguss mit Strahlmittel“. In solchen Fällen werden die restlichen Angaben, wie Bemerkung zum IBA, Berufsbezeichnung, AB oder Teilbetriebsart, stärker gewichtet. Es ist zwar nicht auszuschließen, dass bei der Zuordnung einzelne Fehler gemacht worden sind, diese sind aber durch die zwei fachkundigen Personen soweit wie möglich verringert worden.

Die Zuordnung der Materialuntergruppen zu Finalgruppen ist aufgrund inhaltlicher und statistischer Annahmen durchgeführt worden. Gruppe B beinhaltet hauptsächlich metallische Stäube. In der Untergruppe *Lacke, Anstrich* sind hauptsächlich Messwertpaare zu finden, die bei spanenden Bearbeitungsverfahren von metallischen Komponenten mit Lackanteilen gemessen worden sind. Die Untergruppe *Elektroschrott* besteht ebenfalls hauptsächlich aus Messwertpaaren, die Partikeln von metallischem Schrott aufweisen.

Gruppe C (*Faser-dominiert*) beinhaltet neben mineralischen Fasern und Papier auch *Asphalt, Bitumen*. In dieser verhältnismäßig kleinen Gruppe ($n = 112$) werden überwiegend Prozesse beschrieben, bei denen Fasermaterialien mit Asphalt oder Bitumen beschichtet worden sind. Gruppe A beinhaltet die meisten Messwertpaare und setzt sich aus den unterschiedlichsten Untergruppen zusammen. Diese Gruppe besteht zu ca. 81 % aus mineralischen Stäuben, zu 8,6 % aus Kunststoffstäuben und ca. 10 % aus anderen Stäuben. Aus inhaltlicher Sicht wäre eine Unterteilung der Gruppe zu *Mineralische Stäube* und *Sonstige Stäube* möglich, da sich die Konzentrationsverhältnisse der Untergruppen jedoch statistisch nicht signifikant unterscheiden, werden sie zu einer Gruppe zusammengeschlossen.

Die Bestimmtheitsmaße der Materialgruppen liegen im Mittel niedriger als die der Tätigkeitsgruppen, dies ist auf die größere Messwertanzahl und damit auf die unterschiedlichen stauberzeugenden Prozesse innerhalb der Materialgruppen zurückzuführen, die einen Einfluss auf die Regressionsfunktionen haben.

Da das Ziel dieser Arbeit ist, möglichst genaue Umrechnungsfunktionen für einzelne Gruppen zu bestimmen, ist eine Unterteilung der Tätigkeitsgruppen in die drei Materialgruppen nicht in jedem Fall sinnvoll. Materialgruppen, die sich nicht signifikant unterscheiden, werden unter ihrer Tätigkeitsgruppe zusammengefasst. Eine geringe Anzahl an Messwertpaaren oder eine Änderung von $adj. R^2$ um weniger als 0,01 werden als Ausschlusskriterien zur Bildung der Kombinationsgruppen herangezogen.

Das systematische Einbeziehen der Variablen *Tätigkeit* und *Material* führt insbesondere zur Gruppe 2-B *Heißverarbeitung-Metallstaub-dominant*. Diese Gruppe zeigt im Vergleich zu den anderen abweichende Regressionskoeffizienten und die besten Gütemaße.

5.3 Anwendung der Gleichung (3.3)

Die Voraussetzungen zur Durchführung der linearen Regressionsanalyse, die zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten in Gl. (3.3) notwendig ist, werden mit wenigen Einschränkungen erfüllt. Die Residuenstreuogramme zeigen keine Muster außer dem beschriebenen Schnitt bei $(c_A \leq c_E)$. Durch diese Selektion werden Werte ausgeschlossen, die beispielsweise durch fehlerhafte Messungen zustande gekommen sind. Da die Gruppe dieser Messwertpaare ($n = 592$) vergleichsweise klein ist (wie bei den Schnitten zu großer Konzentrationen, siehe oben), ist das Risiko klein, korrekte Messungen zu eliminieren, die etwa durch Streuungen aufgrund der Messunsicherheit diese Werte erzeugen.

Die Vorschriften zur Regression geben vor, dass die Residuen annähernd normalverteilt sein sollen. Grafisch ist dies bei den meisten Gruppen erkennbar, auch wenn die Normalverteilung nicht mit statistischen Tests nachweisbar ist. Wie bei den Betrachtungen zum Gesamtdatensatz wird durch die hohe Anzahl an Messwertpaaren in den einzelnen Gruppen ein signifikantes Ergebnis des statistischen Tests verursacht, obwohl der Effekt nur gering ist [97]. Wenn die Annahme der Residuennormalverteilung verletzt wird, kann die lineare Regression immer noch durchgeführt werden; das heißt, die Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten, Bestimmtheitsmaße sowie Korrelationskoeffizienten können fehlerfrei berechnet werden [86]. Dagegen führt die Verletzung der Residuennormalverteilungsannahme zu falschen Ergebnissen bei Signifikanztests (z. B. Mittelwertvergleiche zwischen den Gruppen) [80; 86]. Das Risiko eines falschen Signifikanz-

wertes kann jedoch durch hohe Messwertpaarzahlen in den betrachteten Gruppen minimiert werden [86].

In einer Gruppe (Tätigkeitsgruppe: *Umformen*) kann eine Autokorrelation der Residuen nicht ausgeschlossen werden. Falls Autokorrelation vorliegt, werden die Schätzwerte der Regressionsgleichung immer noch fehlerfrei berechnet, nicht jedoch die Standardabweichungen [80]. Bestimmte Signifikanzwerte können damit fehlerbehaftet sein. Da die Durbin-Watson Statistik dieser Gruppe jedoch im Indifferenzbereich liegt, damit keine klare Aussage getroffen werden kann und für keine andere Gruppe Autokorrelation vorliegt, wird diese Beobachtung vernachlässigt.

Für alle Finalgruppen und die heuristischen Gruppen werden Regressionskoeffizienten bestimmt und eine Anwendung der Gl. (3.3) ist in allen Gruppen möglich.

In den nächsten Abschnitten werden die Grenzfälle der Gl. (3.3) beurteilt.

- Die worst-case-Annahme $c_A = c_E$ bzw. $C_o = 0$ und $k = 1$.
- Die lineare Annahme für $c_A < c_E$ bzw. $C_o < 0$ und $k = 1$.

Die worst-case-Annahme wird in diesem Datensatz nicht beobachtet. Alle C_o -Werte in dieser Arbeit sind negativ ($-1,264 \leq C_o \leq -0,430$). Dies ist notwendig, um Messwerte ($c_A > c_E$) bei $k \neq 1$ zu vermeiden.

Darüber hinaus sind alle k -Werte in dieser Arbeit < 1 ($0,500 \leq k \leq 0,946$), obwohl durch die lineare Regressionsanalyse keine Restriktion der Werte $k > 1$ auferlegt wird. Dies lässt auf einen systematischen Effekt schließen. Die resultierenden Funktionen der einzelnen Finalgruppen und heuristischen Gruppen sind nicht linear und das Verhältnis c_A/c_E nimmt bei steigenden E-Staub-Konzentrationen ab. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre, dass bei höheren Staubkonzentrationen Partikeln häufiger aufeinandertreffen, was zu einer häufigeren Agglomeration von Partikeln führen würde. Dadurch steigt der Anteil an größeren und schwereren Partikeln, die sich in der Luft befinden.

Eine weitere Erklärung wäre, dass ungefähr die Hälfte der Messwertpaare mit personengetragenen Messgeräten ermittelt worden sind. Das Verhältnis c_A/c_E ist bei personengetragenen Messungen prinzipiell niedriger als bei stationären, zudem ist die E-Staub-Konzentration bei Messungen an der Person höher (siehe Abschnitt 5.4.3). Stationäre Messgeräte können nur in der Nähe der Emissionsquelle aufgestellt werden, während sich personengetragene zur Messung in unmittelbarer Nähe eignen. Durch

die Sedimentation der größeren Partikeln ist es denkbar, dass die stationären Messgeräte weniger einatembare Stäube sammeln als die Messgeräte, die unmittelbar an der Arbeitskraft angebracht sind.

In weiteren Experimenten könnten unterschiedliche Szenarien getestet werden, in denen beispielsweise die Entfernung zur Expositionsquelle miteinbezogen wird, um diese These zu belegen.

Obwohl für die heuristische Gruppe *Löten* k -Werte im Intervall zwischen 0,873 und 1,019 berechnet werden und *Gießen (Metall)* k -Werte nahe 1 zeigt, sind diese Untergruppen der Kombinationsgruppe 2-B, deren k -Wert ebenfalls < 1 ist. Aus diesem Grund ist es unwahrscheinlich, dass für diese Gruppen ein rein linearer Zusammenhang zwischen c_A und c_E gilt. Außerdem ist das Ergebnis für k bei diesen Gruppen durch wenige Einflusspunkte bestimmt. Ohne diese Einflusspunkte ergeben sich Werte für k , die unter eins liegen und sehr ähnliche Bestimmtheitsmaße aufweisen. Daher gibt es in dieser Arbeit keine Hinweise für die worst-case-Annahme oder den linearen Zusammenhang.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs von A- und E-Staub sollte somit generell die Gl. (3.3) mit $k \leq 1$ und $C_o < 0$ angewendet werden.

Diese Aussage könnte Auswirkungen auf weitere Studien im Bereich der Staubexposition haben, da häufig von einem linearen Zusammenhang von A- und E-Staub ausgegangen worden ist [11; 22; 24]. Durch eine starke Einschränkung der beprobten Tätigkeiten können Gruppen entstehen, die den Rückschluss auf einen linearen Zusammenhang zulassen (siehe heuristische Gruppe *Löten*, Tabelle 4.6 auf Seite 54). Jedoch ist in dieser Arbeit gezeigt worden, dass z. B. die übergeordneten Bereiche, aus denen die spezifischen Tätigkeitsgruppen stammen, keine lineare Korrelation von A- und E-Staub ausweisen und damit eine ermittelte Linearität zufällig ist, oder der lineare Zusammenhang von wenigen Hebelwerten verursacht wird.

In vielen Studien sind bisher nur bestimmte Industriezweige berücksichtigt worden, von diesen ausgehend Rückschlüsse auf Gesamtdatensätze gezogen worden sind. Durch diese Arbeit wird offensichtlich, dass eine Umrechnung mit einem Faktor für einen Datensatz, der aus mehreren Tätigkeiten und Materialien besteht, nicht möglich ist. Die Bereiche müssen vielmehr voneinander abgegrenzt und getrennt voneinander bewertet werden. Durch Gl. (3.3) ist es zusätzlich möglich, Agglomeratoneffekte bei hohen Konzentrationen zu beschreiben [100; 101].

5.4 Weitere Einflussgrößen

5.4.1 Probennahmesysteme

Die am häufigsten verwendeten Probennahmesysteme (GSP, VC-25 G und GSP-10 bzw. FSP-10, VC-25 F, PM 4 F) beider Fraktionen werden in allen Tätigkeitsbereichen eingesetzt. Der Einsatz des PGP-EA beschränkt sich normalerweise auf Schweißprozesse und dient im Regelfall der Bestimmung von Schweißrauch [67]. Aus diesem Grund wird das System mit Ausnahme einer Messung nur in der Tätigkeitsgruppe *Heißverarbeitung* aufgeführt.

Zusätzlich zu den wenigen Messungen, die mit dem PGP-EA durchgeführt worden sind, gibt es 28 weitere E-Staub-Messungen, die mit insgesamt fünf anderen PS vorgenommen worden sind. Durch die geringe Messwertanzahl (<0,4 % des Gesamtdatensatzes) sind die PS nicht repräsentativ, da sie fälschlicherweise auf eine Selektivität der PS für bestimmte Tätigkeitsgruppen schließen lassen.

Es gibt des Weiteren auch kein erkennbares Muster in der Wahl der Probennahmesysteme der Messtechnischen Dienste. Insbesondere die am häufigsten verwendeten Geräte werden von MTD unterschiedlichster Industriezweige angefordert (Abbildungen 4.15 und 4.16).

Die Systeme werden nach internationalen Standards validiert und müssen spezielle Vorgaben erfüllen. Trotz der stark unterschiedlichen Volumenströme (Tabelle 2.3) sind damit Unterschiede in der Sammeleffizienz oder eine Variation der Konzentrationsmesswerte nur im Rahmen ihrer Messunsicherheit zu erwarten. Aus diesem Grund können diese Messdaten bei der Berücksichtigung des Probennahmesystems als Confounder (Störfaktor) auf die Messung des A-Staubes vernachlässigt werden und die Variable Probennahmesystem wird in der linearen Regressionsanalyse nicht berücksichtigt.

5.4.2 Probennahmejahr

Aus den Jahren von 1989 bis 1997 stammen lediglich 1,5 % des Gesamtdatensatzes. Das Verhältnis der Mediane von c_A / c_E unterscheidet sich in dieser Zeitspanne jedoch nicht signifikant von den Verhältnissen in den Jahren 1998 bis 2016. Aus diesem Grund wird keine Unterteilung des Datensatzes nach Jahren gewählt.

Die Mediane der A-Staub-Konzentration zeigen nahezu keine Schwankung über den betrachteten Zeitraum (1998 bis 2016, siehe Abbildung 4.18). Die Mediane der E-Staub-Konzentration unterliegen Schwankungen von maximal $1,02 \text{ mg/m}^3$ (Median c_E im Jahr 1999 gegen Jahr 2008). Es wird in dieser Arbeit ein E-Staub-Konzentrationsbereich vom niedrigsten, oberhalb der Nachweisgrenze gemessenen Wert bis 100 mg/m^3 betrachtet; aus diesem Grund

kann eine Schwankung von ca. 1 % vernachlässigt werden.

Das mediane Verhältnis von c_A / c_E der Jahre 1989 bis 1999 sowie 2001 bis 2016 unterscheidet sich ebenfalls nicht signifikant vom Verhältnis des Jahres 2000, in dem Messungen des Probennahmesystems GSP-10 erstmals in den Datensatz einfließen. Dagegen unterscheidet sich das mediane Verhältnis vom Jahr 1998 (in dem erstmals Messungen mit dem FSP-10 in den Datensatz eingehen) von den Verhältnissen der anderen Jahre im betrachteten Zeitraum.

Wie in Abbildung 4.17 in Abschnitt 4.1.2 dargestellt und durch statistische Tests nachgewiesen worden ist, treten zufällige Messwertschwankungen auf, deren Signifikanz wahrscheinlich durch die große Messwertanzahl verursacht wird [97]. Da außerdem weder ein Trend des Verhältnisses nach der Einführung neuer Probennahmesysteme noch durch Präventionsmaßnahmen über die Jahre hinweg erkennbar ist, wird das Probennahmejahr als zusätzliche Variable von der linearen Regressionsanalyse ausgeschlossen.

Die Umrechnungsfunktionen der Finalgruppen und heuristischen Gruppen lassen sich jedoch aufgrund der vergleichsweise niedrigen Anzahl an Messwertpaaren nicht auf die Jahre vor 1998 übertragen. Da die Daten auch nur in Deutschland erhoben worden sind, können sie nur auf andere Länder übertragen werden, wenn diese im Untersuchungszeitraum vergleichbare Expositionen aufweisen.

5.4.3 Probennahmeart

Bei der Beurteilung der Probennahmeart wird deutlich, dass prinzipiell höhere Konzentrationswerte in beiden Staubfraktionen zu erwarten sind, wenn personengebunden gemessen wird. Die A-Staub-Konzentration bei stationären Messungen nimmt dabei stärker zu als die E-Staub-Konzentration. Aus diesem Grund steigt auch das Konzentrationsverhältnis mit zunehmender A-Staub-Konzentration. Zudem werden höhere Werte für c_A / c_E bei stationären Messungen erreicht. Die medianen Konzentrationsverhältnisse der beiden Probennahmearten unterscheiden sich signifikant.

Auch wenn man stationäre Systeme in der Nähe der Expositionsquelle aufstellt, so gelangen sie doch in der Regel nicht so unmittelbar an die Quelle wie die Arbeitskraft, die das PS an der Person trägt. Damit ist die Staubexposition dort häufig größer als in der Nähe eines stationären Messgeräts. Zusätzliche Faktoren, welche die Konzentrationshöhe bei personengebundenen Messungen beeinflussen, sind beispielsweise die Orientierung des Probennahmekopfes und damit verbunden die Position der Arbeitskraft. Dabei interessiert, mit welcher Hand die Tätigkeit ausgeführt wird und in diesem Zusammenhang,

ob der Sammler auf derselben Körperseite befestigt worden ist. Diese Informationen werden jedoch nicht in der Datenbank hinterlegt, ebenso wie die Angabe, in welchem Abstand zur Expositionsquelle die Messung durchgeführt worden ist.

Stationäre Messungen werden beispielsweise immer dann durchgeführt, wenn aus logistischen Gründen keine personengetragene Messung möglich ist. Dies kann unterschiedliche Gründe haben, z. B. wenn die Arbeitskraft schon personengetragene Messgeräte und Pumpen trägt oder aufgrund des Arbeitsablaufs und den Betriebsbedingungen keine Messung an der Person möglich ist.

Darüber hinaus werden sie genutzt, um die Grundbelastung an einem Ort zu bestimmen. Dass in dieser Arbeit bei stationären Messungen höhere Verhältnisse der Staubkonzentrationen ermittelt werden, lässt sich durch die Bewegung der Partikeln beschreiben. Größere, schwerere Teilchen sedimentieren schneller ab als kleine. Aus diesem Grund werden sie von stationären Messgeräten in geringerer Konzentration erfasst. Ein weiterer möglicher Einflussfaktor auf die Partikeln und die Verhältnisse sind thermische Effekte, die z. B. zu Agglomeration von Teilchen oder zu einer größeren Partikelgeschwindigkeit führen können [102 bis 104]. Hinzu kommt die Luftbewegung, die durch Lüftungsanlagen an den Arbeitsplätzen verursacht wird. All diese Effekte begünstigen die Messung von kleinen, leichten Teilchen, wenn das stationäre Probennahmesystem weiter entfernt ist als das personengetragene.

In manchen Studien werden parallel Messungen mit stationären und personengetragenen Messsystemen bei ebenfalls paralleler Messung von A- und E-Staub durchgeführt. So zeigen beispielsweise *Lillienberg* und *Brisman* (1994), dass bei Messungen in Bäckereien annähernd dieselben Konzentrationswerte beider Fraktionen zu erwarten sind, wenn stationär bzw. an der Person gemessen wird [17]. Im Gegensatz dazu ist das Resultat der Studie von *Koch* et al. (1999) bei vergleichbaren Tätigkeiten in der Bäckerei ein großer Unterschied der mittleren stationären und personengetragenen E-Staub-Konzentrationen ($\Delta c_E = 2,54 \text{ mg/m}^3$), während die A-Staub-Konzentration nahezu identische Ergebnisse zeigt ($\Delta c_A = 0,04 \text{ mg/m}^3$) [105]. *Adamsson* (1979) hat drei verschiedene Tätigkeiten bei Langzeitmessungen für luftgetragenes Cadmium bei der Batterieherstellung verglichen und nur bei einer Tätigkeit (Cadmiumbrikettieren) einen signifikanten Unterschied zwischen stationären und personengetragenen Messungen festgestellt [106]. Ein direkter Vergleich von stationären und personengetragenen, parallelen Messungen aus A- und E-Staub ist in dieser Arbeit aufgrund der Datenstruktur nicht möglich.

Obwohl die Probennahmeart in einigen Messkonstellationen unterschiedliche Ergebnisse geben kann, muss in

der Datenbank MEGA aber davon ausgegangen werden, dass stationäre Messungen nur dann in den Datensatz eingegangen sind, wenn sie dieselben Ergebnisse zeigen wie personengetragene Messungen oder es keine andere Möglichkeit gegeben hat, die Exposition zu bestimmen. Daher kann ein möglicher Einfluss der PA nicht ausgewertet werden.

5.5 Metallische Inhaltsstoffe

Von den betrachteten acht metallischen Inhaltsstoffen zeigen nur drei eine ausreichende Anzahl ($n \geq 30$) von Messwertpaaren, um weitere Analysen durchführen zu können. Die Regressionskoeffizienten von Kobalt und Nickel unterscheiden sich nur marginal, während sich die Messwertpaare von Mangan mit einer völlig anderen Funktion beschreiben lassen (Tabelle 4.14 auf Seite 68). Der Anteil der Inhaltsstoffe Kobalt und Nickel im E-Staub steigt, während sich der Anteil der Inhaltsstoffe im A-Staub nur geringfügig ändert. Bei Mangan ist der Kurvenverlauf steiler; es befinden sich mehr Inhaltsstoffanteile im A-Staub als bei Kobalt und Nickel. Die drei Gruppen sind aufgrund der niedrigen Anzahl an Messwertpaaren und der unbegriffenen Arbeitsbereiche nicht repräsentativ für den Gesamtdatensatz. Werden die Messwertpaare innerhalb der Inhaltsstoffgruppe nach Tätigkeitsgruppen unterteilt, so fallen bei der grafischen Auswertung der Streudiagramme Hebelwerte auf. Wird beispielsweise bei der Kombination *Mangan-Heißverarbeitung* (siehe Abbildung 4.19) das Messwertpaar $(c_{E(\text{Mn})} | c_{A(\text{Mn})}) = (1,30 | 0,25)$ entfernt, so ändert sich C_0 deutlich (-0,714 vs. -0,542; $\Delta k = 0,039$) während die Gütemaße nahezu konstant bleiben. Analog dazu ändern sich die Regressionskoeffizienten bei den Gruppen *Mangan-Spanende Bearbeitung* und *Kobalt-Spanende Bearbeitung* ebenfalls deutlich, wenn die Hebelwerte in der Analyse nicht berücksichtigt werden. Die Gruppen beinhalten zwischen 36 und 61 Messwertpaare. Aufgrund der wenigen Messwertpaare macht sich ein Hebelwert deutlicher bemerkbar als bei vergleichsweise größeren Gruppen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Beurteilung der Cook'schen Distanz alleine nicht aussagekräftig genug ist, um den Effekt von einzelnen Hebelwerten zu beurteilen, sondern eine grafische Auswertung zusätzlich Aufschluss geben kann. Ein Ausschluss der Werte und eine Ausreißeranalyse ist für diese Werte nicht sinnvoll, da es sich um reale Messwerte handelt und es keine Veranlassung gibt, in Zweifel zu ziehen, dass es sich um Expositionen unter Realbedingungen an den Arbeitsplätzen der Industrie handelt.

Es wäre möglich, dass sich der Verlauf der Funktionen der Inhaltsstoffe ändert, wenn es sich bei der Art des bearbeiteten Metalls um hoch oder niedrig legierte Metalle handelt und welchen Anteil das jeweilige Element an dem bearbeiteten Material hat. So werden Eisen häufig Kohlenstoff und einzelne Begleitelemente hinzulegiert, damit

Stähle in unterschiedlicher Qualität hergestellt werden können. Ni, Mn und Co begünstigen in höheren Gehalten die Bildung von austenitischen Stählen, die schlecht zerspanbar sind und sich durch ihre hohe Zähigkeit und Adhäsionsneigung auszeichnen [107; 108]. Dadurch werden beim Zerspanen vorwiegend längere Späne gebildet [108]. Durch den Zusatz von beispielsweise Chrom, Molybdän und Aluminium entstehen vorwiegend ferritische Stähle, die eine niedrigere Zähigkeit aufweisen [107; 108]. Es ist denkbar, dass bei ferritischen im Vergleich zu austenitischen Stählen Staubpartikeln von geringerer Größe produziert werden. In weiteren Studien könnte diese Betrachtung näher untersucht werden.

Zusätzlich besteht bei den Inhaltsstoffen im Vergleich zu den reinen Staubfraktionen die Möglichkeit, dass sie sich unterschiedlich in den Fraktionen anreichern und somit Einfluss auf die Regressionsanalyse nehmen. Beispielsweise verbrennen beim Schweißen von Stahl zuerst die Elemente Chrom, Silizium und Mangan zu hochschmelzenden Oxiden. Mn erniedrigt zusätzlich den Schmelzpunkt der anderen im Stahl enthaltenen Elemente [107]. Beim Schweißen entstehen vorwiegend Partikeln $<1 \mu\text{m}$ [109]. Dadurch ist es denkbar, dass sich die Elemente hauptsächlich im A-Staub anreichern und sogar den enthaltenen Anteil im E-Staub übersteigen.

Wenn sich ein Werkstoff durch eine hohe Duktilität auszeichnet, bedeutet das, dass Partikeln, die bei spanender Bearbeitung entstehen, tendenziell größer sind und somit ein höherer E-Staub-Anteil resultiert. Stähle, die sich durch hohe Zähigkeit und Verformungsfestigkeit auszeichnen, haben meistens einen hohen Anteil an Austenit [108]. Elemente, welche die Bildung von Austenit begünstigen sind – wie oben schon genannt – beispielsweise Ni und Mn. Aus diesem Grund wäre es denkbar, dass bei spröden Metallen eine Anreicherung dieser Elemente im E-Staub zu beobachten ist.

Diese Annahmen könnten mit verstärkten Messungen während Schweiß- und Zerspanungsprozessen bei genauer Kenntnis der Zusammensetzung des betrachteten Werkstücks an Arbeitsplätzen überprüft werden.

Die gebildeten Kombinationsgruppen aus Inhaltsstoff und Tätigkeit sind nicht repräsentativ für die gesamte Tätigkeitsgruppe, da zum einen nur wenige Messwertpaare zum Erstellen der Gruppe vorhanden waren und somit in den Gruppen einzelne Arbeitsbereiche dominieren (siehe Tabelle 4.13), sodass die gebildeten Kombinationsgruppen aus Inhaltsstoff und Tätigkeit Einzelfälle darstellen, die ähnlich zu den heuristischen Gruppen der A- und E-Staub-Auswertung sind.

Da die einzelnen Gruppen (sowohl Inhaltsstoff- als auch Kombinationsgruppen) jeweils nur wenige Messwertpaare beinhalten, einzelne Hebelwerte erkennbar und die

Funktionen nicht repräsentativ für die betrachtete Gruppe sind, wird die Anwendung der Umrechnungsfunktionen nicht empfohlen. Die Ergebnisse können nach weiteren Messungen in diesen Bereichen als Basis für spätere Auswertungen herangezogen werden.

5.6 Anwendung der Ergebnisse

Die gebildeten Finalgruppen sind sehr heterogen in ihrer Zusammensetzung. Bei der Verwendung der Umrechnungsfunktionen zu epidemiologischen und toxikologischen Analysen muss die Anwendbarkeit im Vorfeld sorgfältig überprüft werden.

Wenn innerhalb einer bestimmten Gruppe $\ln(c_A^*)$ mithilfe der ermittelten Regressionskoeffizienten aus Tabelle 4.6 berechnet werden soll, dann liegt das Ergebnis in einem Konfidenzintervall von $\pm 1,96 \cdot s_{Fit}(\ln(c_A^*))$. Diese Varianz muss ergänzend zu den weiteren Unsicherheiten, wie beispielsweise der Messunsicherheit der Probennahme und analytischen Verfahren, berücksichtigt werden. Die Fehlerterme, die durch die Umrechnungsfunktion bedingt sind, fließen exponentiell in die Betrachtung ein, wohingegen die Messunsicherheitsfaktoren linear eingerechnet werden müssen und somit einen verhältnismäßig kleinen Anteil an der Varianz der Regressionskoeffizienten haben. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die kleineren Werte des Intervalls s_{Fit} nur den Bereich um den Mittelwert von $\ln(c_E^*)$ beschreiben.

Die Qualität der Analyse wird mit dem Korrelationskoeffizienten und dem Bestimmtheitsmaß bemessen. Beide Parameter zeigen steigende Werte bei genauerer Beschreibung der Gruppe (*Tätigkeiten, Material*). Die beste Beschreibung der Daten liefern die Gruppen α bis λ in Tabelle 4.6 und 4.9. In diesen Gruppen werden 73 bis 87 % der Varianz in den Daten durch die Regression erklärt (*adj.R²* 0,733 bis 0,869). Diese heuristischen Gruppen bilden gleichzeitig das Kernstück dieser Arbeit. Durch die genaue Beschreibung der enthaltenen Arbeitsbereiche (siehe Tabelle 4.9) wird es vielleicht in Zukunft möglich sein, die Regressionskoeffizienten dieser Gruppen durch Experimente zu bestätigen.

Zur Bestimmung der A-Fraktion in anderen Studien wird empfohlen, die Umrechnungsfunktionen der heuristischen Gruppen α bis λ in Tabelle 4.6 und 4.9 oder die Kombinationsgruppen 1-AC bis 6-BC zu verwenden. Falls die vorzunehmende Studie nicht zu diesen Gruppen passt, wird empfohlen, die Funktionen der Tätigkeitsgruppen (Tabelle 4.6, Bz. 1 bis 6) oder der Materialgruppen (Tabelle 4.6, Bz. A bis C) unter Berücksichtigung der größeren Ergebnisunsicherheit heranzuziehen. Von der Verwendung der Formel des Gesamtdatensatzes (Gruppe 0 in Tabelle 4.6) wird abgeraten.

5.7 Vergleich mit der Literatur

Im Vergleich mit anderen Studien zeigt sich, dass oft ein einzelner Umrechnungsfaktor für c_A / c_E berechnet worden ist. Dies entspricht dem linearen Grenzfall und nicht der Potenzfunktion von Gl. (3.4), die in dieser Arbeit bestätigt worden ist.

In einer Studie von *Jenkins et al.* (2005) ist gezeigt worden, dass beim Metallschutzgasschweißen hauptsächlich Partikeln $< 1 \mu\text{m}$ entstehen. Weitere Studien zeigen bei verschiedenen Schweißprozessen A-Staub-Konzentrationen zwischen 50 und 60 % anteilig vom E-Staub [110; 111]. Die heuristische Gruppe γ (*Schweißen*) dieser Arbeit unterstützt diese Ergebnisse unter Berücksichtigung der Regressionskoeffizienten aus Tabelle 4.6 in einem Bereich von $0,65 \text{ mg/m}^3 \leq c_E \leq 1,55 \text{ mg/m}^3$.

Lehnert et al. (2012) haben in einer Studie, die insgesamt fünf unterschiedliche Schweißprozesse und 241 Messungen mit dem PGA-EA und GSP-System umfasst, ein $adj.R^2$ von 0,91 erreichen können [25]. Dazu ist nach vorausgegangener logarithmischer (\log_{10}) Transformation der (mit dem PGP-EA ermittelten) Messwerte eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt worden. Zur Umrechnung geben *Lehnert et al.* (2012) ebenfalls eine Umrechnungsfunktion an. Die Regressionskoeffizienten, die dort berechnet worden sind, können nach Umrechnung mit denen aus dieser Arbeit verglichen werden. *Lehnert et al.* (2012) beschreiben mit $k = 1,061$ und $C_0 = -0,758$ einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen A- und E-Staub

bei dieser Tätigkeit. Im Gegensatz dazu werden in dieser Arbeit in der heuristischen Gruppe *Schweißen* Koeffizienten von $k = 0,803$ und $C_0 = -0,601$ und ein vergleichsweise geringeres $adj.R^2$ von 0,77 bestimmt. Jedoch ist diese heuristische Gruppe heterogener, da neun verschiedene Schweißprozesse und insgesamt 1 126 Messwertpaare berücksichtigt werden.

Analog zu *Lehnert et al.* (2012) haben *Okamoto et al.* (1997) logarithmische Transformationen (\log_{10}) der Konzentrationsmesswerte in bestimmten Tätigkeitsbereichen durchgeführt und Umrechnungsfunktionen zu den Gruppen *Schleifen* ($n = 669$, $R = 0,81$), *Pulverförderung* ($n = 442$, $R = 0,65$), *Gießen* ($n = 134$, $R = 0,80$) und *Schweißen* ($n = 152$, $R = 0,85$) angegeben. In dieser Arbeit zeigen die heuristischen Gruppen *Gießen (Metall)* ($n = 77$, $R = 0,88$) und *Schweißen* ($n = 1 125$, $R = 0,87$) jeweils bessere Korrelationskoeffizienten. Tabelle 5.1 zeigt den Vergleich der Regressionskoeffizienten von *Okamoto et al.* (1997) (nach Umrechnung) und dieser Arbeit für die betrachteten Gruppen. In der Studie von *Okamoto et al.* (1997) ist nicht genau beschrieben, welche Materialien dem Schleifprozess während der Messung unterzogen werden; aus diesem Grund wird ein Vergleich mit der heuristischen Gruppe *Schleifen (mineralisch)* angestellt. Für die Gruppe *Pulverförderung* gibt es in dieser Arbeit keine vergleichbare heuristische Gruppe. Ein Vergleich mit der Tätigkeitsgruppe *Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren* zeigt für Letztere einen höheren Korrelationskoeffizienten ($\Delta R > 0,1$) und einen annähernd ähnlichen Regressionskoeffizienten k , während sich C_0 stark unterscheidet.

Tabelle 5.1:

Vergleich der Regressionskoeffizienten von *Okamoto et al.* (1997) [26] und dieser Arbeit

Tätigkeit aus <i>Okamoto et al.</i> [26]	Gruppe aus dieser Arbeit	k <i>Okamoto et al.</i>	k Gruppen dieser Arbeit	C_0 <i>Okamoto et al.</i>	C_0 Gruppen dieser Arbeit
Schleifen ($n = 669$)	<i>Schleifen (mineralisch)</i> ($n = 107$)	0,56	0,747	-1,33	-0,948
Pulverförderung ($n = 442$)	<i>Lagern, Füllen, Fördern</i> ($n = 3 473$)	0,46	0,586	-1,56	-1,093
Gießen ($n = 134$)	<i>Gießen (Metall)</i> ($n = 77$)	0,70	0,913	-1,47	-0,430
Schweißen ($n = 152$)	<i>Schweißen</i> ($n = 1 125$)	0,78	0,803	-0,830	-0,601

Die Koeffizienten sind in den Gruppen *Schweißen* am ähnlichsten und unterscheiden sich bei *Gießen* am meisten. Für keine der Tätigkeitsgruppen der Studie von *Okamoto et al.* (1997) wird genau beschrieben, welche Verfahren, d. h. welche Arbeitsbereiche, beprobt werden. Im Vergleich dazu sind die heuristischen Gruppen in dieser Arbeit sehr spezifisch, z. B. *Gießen (Metall)* beinhaltet lediglich drei verschiedene Arten des Metallgusses. Es ist möglich, dass die Unterschiede in den Regressionskoeffizienten

von den unterschiedlichen Arbeitsbereichen in den Gruppen hervorgerufen werden.

Außerdem ist denkbar, dass sich die höheren Messwertzahlen in den jeweiligen Gruppen auf Koeffizienten und die Gütemaße auswirken.

Notø et al. (2016) haben ein Verhältnis von $c_A / c_E \approx 0,09$ mit $adj.R^2 = 0,78$ ($n = 112$) bestimmt [22]. Die Studie beinhaltet Tätigkeiten wie *Mahlen, Zerkleinern* und *Fräsen* [22]

von Zement. In dieser Arbeit gibt es keine heuristische Gruppe, welche diesen Tätigkeiten exakt entspricht; aus diesem Grund ist ein Vergleich nur mit den unspezifischeren Gruppen *Spanende Bearbeitung* (Gruppe 4, Tabelle 4.6) oder *Mineralisch-dominierte Stäube* (Gruppe A, Tabelle 4.6) mit den Koeffizienten $k \approx 0,58$, $C_0 \approx -1,0$ möglich. Ein Konzentrationsverhältnis von $\approx 0,09$ kann mit diesen Koeffizienten nur für $c_E > 30 \text{ mg/m}^3$ existieren (c_E bei *Notø et al. (2016): 11,4 mg/m}^3).*

In jedem Fall können die Umrechnungsfunktionen dieser Arbeit als Zusatzinformation in Studien wie z. B. *Dahmann et al. (2007) [21]* herangezogen werden, wenn historische Messwerte rekonstruiert oder mit Messwerten verglichen werden sollen.

5.8 Partikelgrößenverteilungen der Umrechnungsfunktionen

Die Partikelgrößenverteilung hängt vom aerodynamischen Durchmesser D_{ae} ab. Dieser bezieht sich auf den Durchmesser einer kugelförmigen Partikel mit einer Dichte von 1 g/cm^3 [2]. In der Realität liegen jedoch meistens Partikeln mit unregelmäßigen Formen vor. In dieser Arbeit werden die Partikelformen innerhalb der einzelnen Gruppen nicht beschrieben, sondern die idealisierte Form mit der Sphärizität = 1 angenommen.

Es ist möglich, mit theoretischen Berechnungen allen heuristischen Gruppen Partikelgrößenverteilungen zuzuordnen, die zu denselben Verhältnissen aus A- und E-Staub führen, wie von den Umrechnungsfunktionen beschrieben. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeweils nur eine Partikelgrößenverteilung für die Gesamtheit der Schwebstoffe an jedem Punkt der Umrechnungsfunktion vorliegt. Dabei ist es notwendig, dass sich diese Partikelgrößenverteilung im Definitionsbereich der Umrechnungsfunktion (Gl. (3.4)) ändert. Nur bei einer linearen Abhängigkeit könnte eine einzige Partikelgrößenverteilung die (lineare) Umrechnungsfunktion erklären. Die an Arbeitsplätzen möglichen Partikelgrößenverteilungen für Gesamtschwebstoffe werden DIN EN 13205-2 entnommen [36].

Jede Umrechnungsfunktion gibt einen Bereich von Konzentrationsverhältnissen vor, der zwischen $\hat{c}_{A_E(\min)}/c_{E(\min)}$ und $\hat{c}_{A_E(\max)}/c_{E(\max)}$ liegt (siehe Gl. (4.2) und (4.3)). Je nach Breite des berechneten Intervalls von möglichen Konzentrationsverhältnissen, ist der Bereich möglicher *MMAD* und *GSD* für eine heuristische Gruppe unterschiedlich groß. Die Gruppen *Löten* und *Gießen (Metall)* beschreiben ein kleines Intervall für mögliche Konzentrationsverhältnisse im Bereich zwischen 0,49 bis 0,62 (*Löten*) und 0,54 bis 0,74 (*Gießen (Metall)*). Innerhalb dieser Intervalle sind Partikelgrößenverteilungen zu erwarten, die einen hohen Anteil im Bereich des A-Staubes haben. Diese Annahme wird durch das Höhenliniendiagramm (Abbildung 4.24)

bestätigt. Obwohl bei der Gruppe *Schweißen* ebenfalls hauptsächlich A-Staubgrößen-Verteilungen anzunehmen sind, ist ein breiteres Intervall für c_A / c_E mit 0,27 bis 0,88 berechnet worden. Gerade beim *Schweißen* sind in der Datenbank Zusatzangaben zu weiteren Tätigkeiten gemacht (siehe oben), die belegen, dass hier die Annahme verletzt ist, nur eine Verteilung für die gesamten Schwebstoffe vorliegen zu haben.

Gruppen, die zu hohen Konzentrationen von E-Staub führen, sind *Strahlen*, *Meißeln*, *Bossieren*, *Stemmen* und *Drahtziehen*. Da der Draht beim *Drahtziehen* Walz- und Ziehprozessen unterworfen wird, wäre es denkbar, dass tendenziell kleinere Partikeln bei der Bearbeitung entstehen. Durch die ermittelten Konzentrationsverhältnisse können jedoch im Höhenliniendiagramm Partikelgrößenverteilungen mit einem *MMAD* zwischen ca. 4 und 30 μm abgelesen werden. Die Gruppe *Hochtemperaturschneiden* deckt nahezu alle möglichen Kombinationen von *MMAD* und *GSD* ab, die in DIN EN 13205-2 angegeben werden.

Theoretisch können mehrere Partikelgrößenverteilungen der Gesamtschwebstoffe dasselbe Verhältnis aus c_A / c_E an einem Punkt einer Umkehrfunktion erzeugen, nämlich alle, die auf der entsprechenden Höhenlinie liegen. Welche Partikelgrößenverteilung an einem Punkt vorliegt, und wie sie sich entlang der Umrechnungsfunktion ändert, ist aus dieser Analyse nicht bestimmbar. Es werden aber Voraussagen gemacht, welche Kombinationen aus *MMAD* und *GSD* möglich sind, die in zukünftigen Experimenten verifiziert werden können. Darüber hinaus ist vor allem für Gruppen mit einem schmalen Bereich großer Konzentrationsverhältnisse (z. B. *Löten*) klar, dass sich die Partikelgrößenverteilung vor allem im *MMAD* längs der Umrechnungsfunktion ändern müssen. Ob sich darüber hinaus die *GSD* ändert und in welcher Richtung (von groß nach klein oder von klein nach groß) kann nur durch weitere Experimente geklärt werden.

Aus diesem Grund ist auch ein Vergleich der bestimmten Lage- und Streumaße nur mit der vorhandenen Literatur möglich. So werden beispielsweise in einer Studie von *Dasch et al. (2005)* beim Nasszerspanen von Metall in der Automobilindustrie *MMAD* von 1,25 μm und *GSD* von 3,2 gemessen. Im Gegensatz dazu wird für alle Tätigkeitsfinalgruppen dieser Arbeit für *GSD* = 3,25 ein Bereich von 2 bis 30 μm (*MMAD*) angegeben [99].

Die Ergebnisse der Studie von *Bilgin et al. (2012)* zeigen mittlere Partikelgrößenverteilungen zwischen 2,7 und 3,5 μm bei Schleifprozessen von Marmor in der Ziegelindustrie [112], während diese Arbeit mögliche *MMAD* von 4 bis 9 μm (bei *GSD* = 1,75) bzw. 4 bis 25 μm (bei *GSD* = 3,25) in der heuristischen Gruppe *Schleifen (mineralisch)* ermittelt.

Bei der Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen beim Schweißen werden häufig $MMAD < 0,5 \mu\text{m}$ ermittelt. Es handelt sich in diesen Fällen um ultrafeine Partikeln bzw. Nanopartikeln, die in dieser Arbeit nicht betrachtet werden [109; 113].

In Schweißrauchen liegen verschiedene Arten von Partikeln vor: einzelne Partikeln mit einer Größe von wenigen Nanometern (bis zu $0,1 \mu\text{m}$), agglomerierte bzw. verschmolzene Partikeln mit einer Größe von bis zu $1 \mu\text{m}$ und größere, gröbere unagglomerierte Partikeln mit ($1 \mu\text{m} \leq (D_{ae}) \leq \text{ca. } 20 \mu\text{m}$) [109]. In dieser Arbeit werden mögliche $MMAD$ zwischen 2 und $3 \mu\text{m}$ bei $GSD = 1,75$ und $GSD = 3,25$ angegeben. In der Industrie erfolgt häufig keine räumliche Abtrennung der Schweißarbeitsplätze von anderen Arbeitsbereichen wie z. B. Schleifarbeitsplät-

zen. Aus diesem Grund ist es möglich, dass die größeren Lagemaße aus einer Vermischung von Partikeln aus verschiedenen Tätigkeiten resultieren. Dies ist auch bei einigen Messwertpaaren in der Datenbank dokumentiert.

Insgesamt hat dieser Teil der Arbeit gezeigt, dass die Konzentrationsverhältnisse, wie sie die Umrechnungsfunktionen vorhersagen, mit Partikelgrößenverteilungen der Gesamtschwebstoffe erklärbar sind, wie sie in DIN EN 13205-2 für Arbeitsplätze beschrieben sind. Die Annahme einer einzigen Partikelgrößenverteilung ist bei realen Schweißarbeitsplätzen nur eingeschränkt gültig; für andere Arbeitsplätze ist es aber möglich, die hier getroffenen Vorhersagen durch Messungen der Partikelgrößenverteilungen zu verifizieren.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Arbeitsschutzsektor haben sich bislang nur wenige Studien mit der Umrechnung von alveolengängigem und einatembarem Staub befasst. Häufig wird die Möglichkeit einer Umrechnung von Konzentrationen diskutiert, wenn diese mit unterschiedlichen Probennahmesystemen gemessen worden sind. Außerdem werden in vielen Studien beispielsweise Umrechnungsfaktoren zwischen der Staubfraktion „total dust“ und einatembarem Staub diskutiert.

Durch die wachsende Kenntnis um die Gesundheitsrisiken, die insbesondere mit der Inhalation von alveolengängigem Staub einhergehen, ist das Interesse an einer Umrechnung der Konzentration von einatembarem in alveolengängigen Staub in den letzten Jahren immer weiter gestiegen. Insbesondere zur Beurteilung von Berufskrankheiten oder retrospektiven Auswertungen von Expositionshöhen an Arbeitsplätzen ist eine Umrechnung notwendig.

Auf der Basis der Expositionsdatenbank MEGA des IFA ist in dieser Arbeit ein Datensatz von 15 120 Messwertpaaren aus einatembarem und alveolengängigem Staub herausgearbeitet worden, die parallel an vielen unterschiedlichen Arbeitsplätzen in der Industrie gemessen worden sind. Nach der Bildung von Tätigkeits- und Materialgruppen kann mit dieser Arbeit gezeigt werden, dass eine Umrechnung der A- und E-Staub-Konzentrationen mit einem einzelnen Faktor für den gesamten Datensatz nicht möglich ist. Stattdessen bildet der umfangreiche Datensatz nach logarithmischer Transformation der Konzentrationen eine gute Basis zur Entwicklung von Umrechnungsfunktionen mittels linearer Regressionsanalyse in systematisch gebildeten Tätigkeits-, Material- und Kombinationsgruppen sowie heuristischen Gruppen.

Die wichtigste Prädiktorvariable bei der Regressionsanalyse ist der einatembare Staub. Allein durch ihn werden 58,5 % der Variation des A-Staubes erklärt. Eine Verbesserung und weitere Erklärung des Modells erreicht man mit der systematischen Miteinbeziehung der Variablen *Tätigkeit* und *Material*. Die Variablen *Probennahmesystem*, *-art* und *-jahr* müssen bei der Analyse nicht mit berücksichtigt werden, da ihr Einfluss auf die Höhe des Konzentrationsverhältnisses c_A / c_E nicht nachgewiesen oder ausgeschlossen werden kann. Der Datensatz wird mit dem linearen Regressionsmodell noch besser in kleinen Gruppen beschrieben, wenn Arbeitsbereiche mit ähnlichen Tätigkeiten und Regressionskoeffizienten zusammengefügt werden, wie man an den heuristischen Gruppen α bis γ (siehe Tabelle 4.6) erkennen kann. Bei diesen Gruppen werden 73 bis 87 % der Varianz in den Daten mithilfe der Regressionsfunktionen beschrieben. Im Vergleich dazu sind die Finalgruppen heterogener und

weniger spezifisch. Aus diesem Grund ist die Umrechnung von E- in A-Staub in diesen Gruppen mit einem größeren Fehler behaftet.

Es gibt keinen systematischen Weg, um heuristische Gruppen zu bestimmen. Aus diesem Grund sind sie mithilfe von „Trial & Error“-Auswertungen, die auf inhaltlichen und statistischen Aspekten basieren, gebildet worden.

Bei der Gruppenbildung sollte auch die grafische Darstellung der Messwertpaare, z. B. in Form eines Streudiagramms, berücksichtigt werden, da sogenannte „leverage points“ (Hebelwerte) mögliche Regressionsfunktionen verzerren können, ungeachtet des statistischen Testergebnisses (Cook'sche Distanz). So ist in dieser Arbeit beispielsweise ein vermeintlich linearer Zusammenhang zwischen A- und E-Staub in der heuristischen Gruppe Lötten auf einen solchen Hebelwert zurückzuführen.

Ein solcher linearer Zusammenhang von A- und E-Staub ist in dieser Arbeit generell nicht nachweisbar. Zur Beschreibung von Daten und der Umrechnung von Konzentrationswerten empfiehlt diese Arbeit Umrechnungsfunktionen nach Gl. (3.3) mit $k \leq 1$ und gleichzeitig $C_0 < 0$.

Bei verstärkten und gezielten Parallelmessungen von A- und E-Staub in interessierenden Tätigkeitsbereichen ist es in Zukunft voraussichtlich möglich, weitere heuristische Gruppen herauszubilden oder die in dieser Arbeit aufgeführten Regressionskoeffizienten zu verifizieren. Wünschenswert wären außerdem weitere Informationen zu den durchgeführten Messungen, wie beispielsweise verwendetes Werkzeug, der Einsatz von Kühlschmierstoffen oder der Abstand zur Emissionsquelle. Diese Angaben würden weitere Unterteilungsmöglichkeiten für Tätigkeitsgruppen bieten und könnten zusätzlich zur Risikobewertung an spezifischen Arbeitsplätzen verwendet werden.

In dieser Arbeit kann darüber hinaus mit theoretischen Berechnungen gezeigt werden, dass die Konzentrationsverhältnisse, wie sie aus den Umrechnungsfunktionen resultieren, mit Partikelgrößenverteilungen der gesamten Schwebstoffe in der Luft (unter der Annahme lognormalverteilter Massendichte) erklärbar sind, wie sie in DIN EN 13205-2 für Arbeitsplätze angegeben werden. In dieser Arbeit sind keine Feldversuche oder andere experimentelle Messungen zu Partikelgrößen an Arbeitsplätzen durchgeführt worden. Es wäre wünschenswert, die theoretisch bestimmten Kombinationen aus dem massebezogenen medianen aerodynamischen Durchmesser *MMAD* und der geometrischen Standardabweichung *GSD* ebenfalls in Zukunft durch experimentelle Messungen zu verifizieren.

Erstmals ist in dieser Arbeit eine umfassende Betrachtung zur Umrechnung von einatembarem in alveolengängigen Staub in verschiedenen Tätigkeitsbereichen und mit verschiedenen Materialien vorgenommen worden. Die Umrechnungsfunktionen können in vergleichenden Studien Anwendung finden und zu Vergleichszwecken bei Auswertungen zur Ermittlung von Berufskrankheiten und epidemiologischen Studien herangezogen werden. Jedoch sollten die Funktionen dieser Arbeit nur verwendet werden, wenn bei der Anwendung genaue Informationen zu den Expositionsbedingungen, wie beispielsweise zu Tätigkeit oder Material, vorliegen. Falls die Arbeitsbereiche der betreffenden Studie nicht zu denen der heuristischen Gruppen (Gruppe α bis γ , siehe Tabelle 4.6) oder den Kombinationsgruppen (Gruppen 1-AC bis 6-BC, siehe Tabelle 4.6) passen, werden die Umrechnungsfunktionen der Tätigkeitsgruppen (1 bis 6) oder der Materialgruppen (A bis C) trotz der größeren Ergebnisunsicherheit empfohlen. Von der Anwendung der Funktion des Gesamtdatensatzes wird abgeraten.

Das Gesundheitsrisiko inhalierter Stäube wird durch metallische Inhaltsstoffe zusätzlich erhöht, wenn diese

beispielsweise kanzerogen oder giftig wirken oder allergische Reaktionen im Körper hervorrufen können.

In dieser Arbeit sind die ermittelten Konzentrationen der Elemente Mn, Ni und Co berücksichtigt worden. Es ist außerdem analog zur Auswertung für A- und E-Staub eine Unterteilung der Messwertpaare nach Tätigkeiten erfolgt. Die resultierenden Gruppen bestehen aus ein bis zwei bestimmten Arbeitsbereichen (z. B. *Nickel-Spanende Bearbeitung*: AB Trockenschleifen = 75,4 % der Messwertpaare ($n = 46$)). Aus diesem Grund sind diese Gruppen als heuristische Gruppen zu betrachten. Aufgrund geringer Messwertpaarzahlen wird von der Anwendung der systematisch ermittelten Umrechnungsfunktionen dieser Elemente (und der Tätigkeitsgruppen) abgeraten, da sie nicht repräsentativ für den jeweiligen Datensatz sind.

Die Betrachtungen und Auswertungen zu den Inhaltsstoffen in dieser Arbeit können aber als Basis für nachfolgende Studien und Messungen herangezogen werden. Dazu wären in Zukunft auch weitere Parallelmessungen von Mn, Ni und Co in A- und E-Staub an verschiedenen Arbeitsplätzen wünschenswert.

7 Anhang

Die Abbildungen 7.1 bis 7.28 zeigen Streudiagramme der Realmesswerten und den zugehörigen Trendlinien aller gebildeten Gruppen.

Abbildung 7.1:

Streudiagramm Gesamtdatensatz mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 15\ 120$

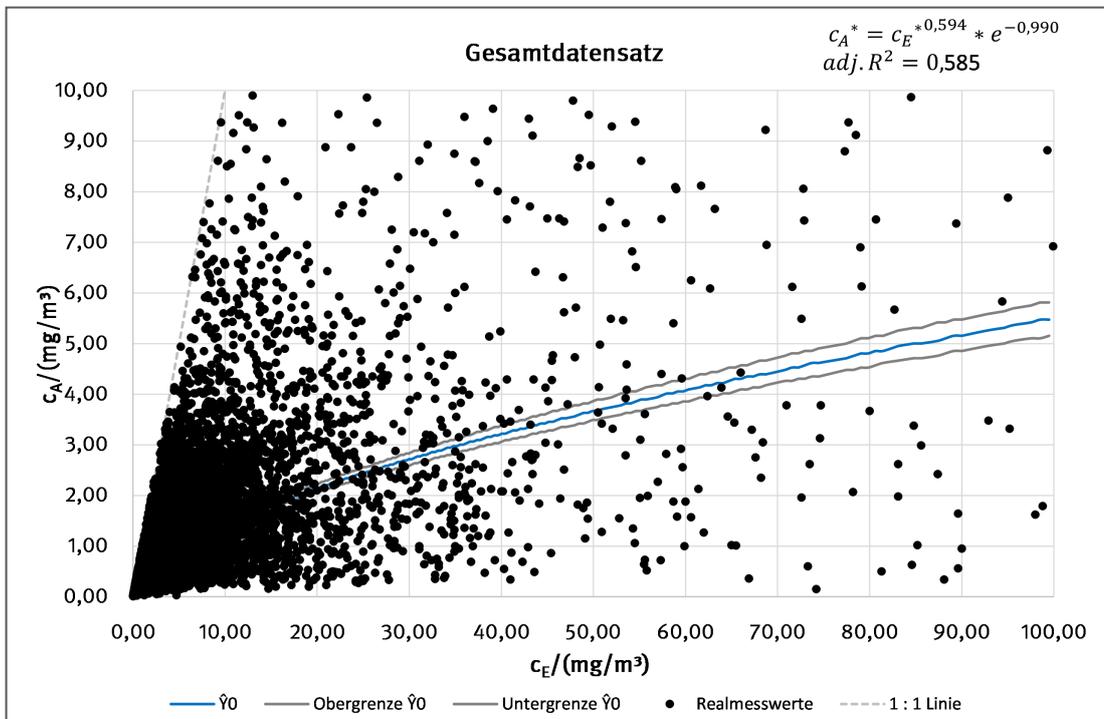


Abbildung 7.2:

Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: *Oberflächenbearbeitung* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 805$

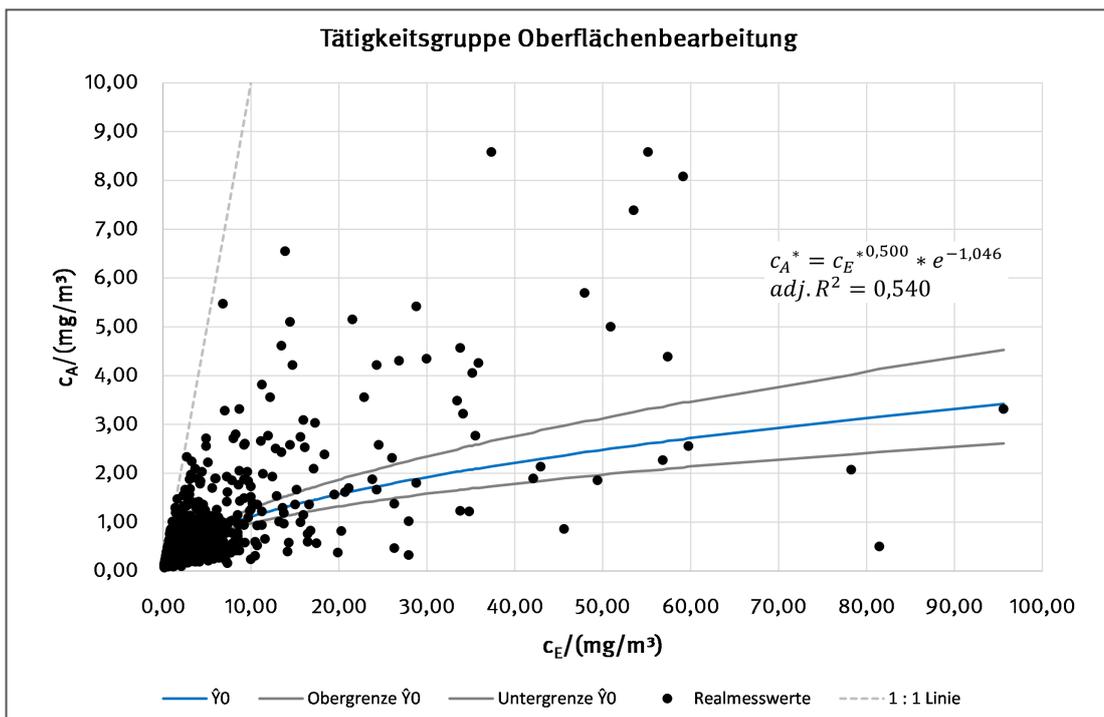


Abbildung 7.3:
 Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: *Heißverarbeitung* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 2\,974$

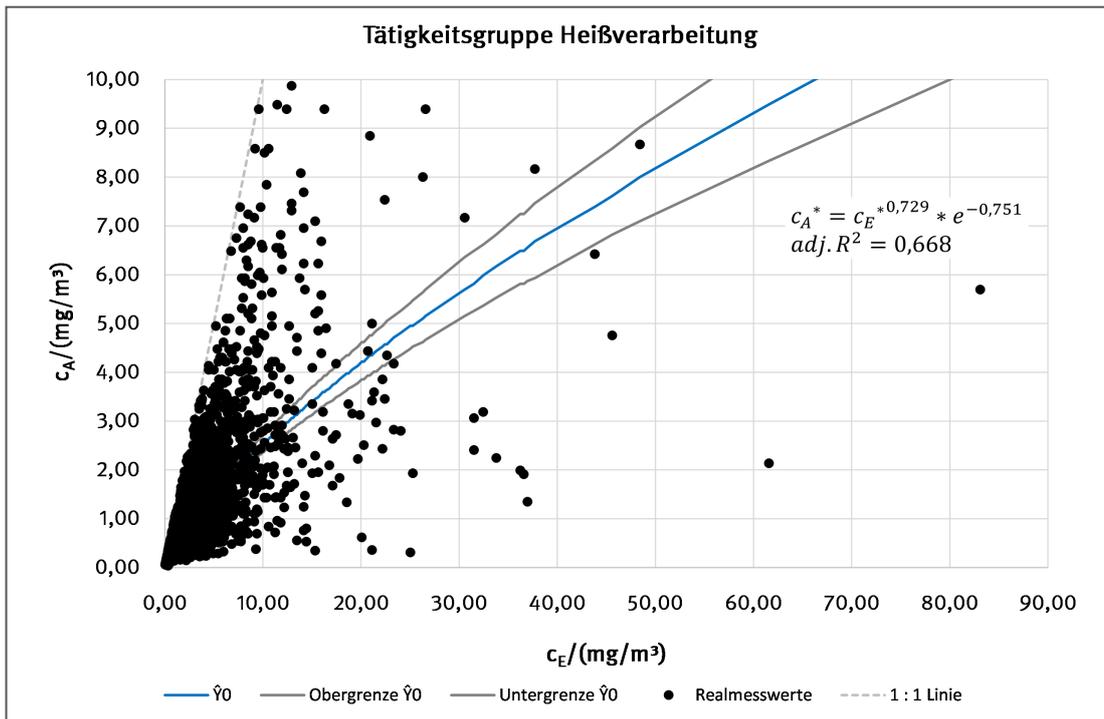


Abbildung 7.4:
 Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: *Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 3\,473$

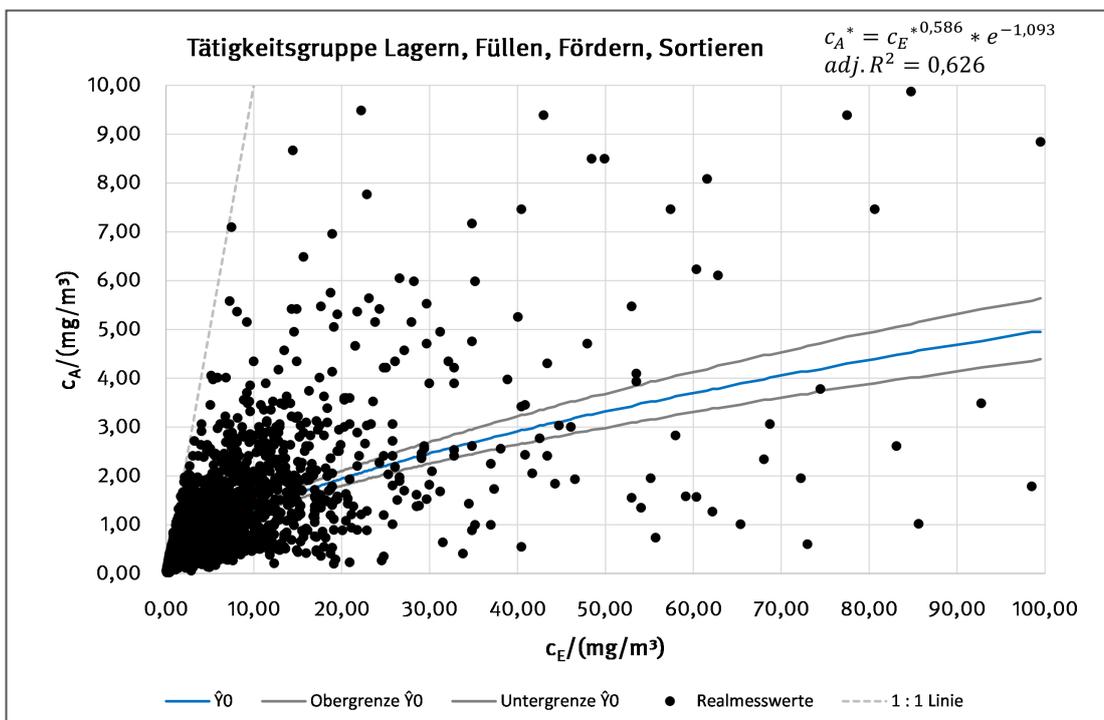


Abbildung 7.5:

Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: *Spanende Bearbeitung* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 4\,640$

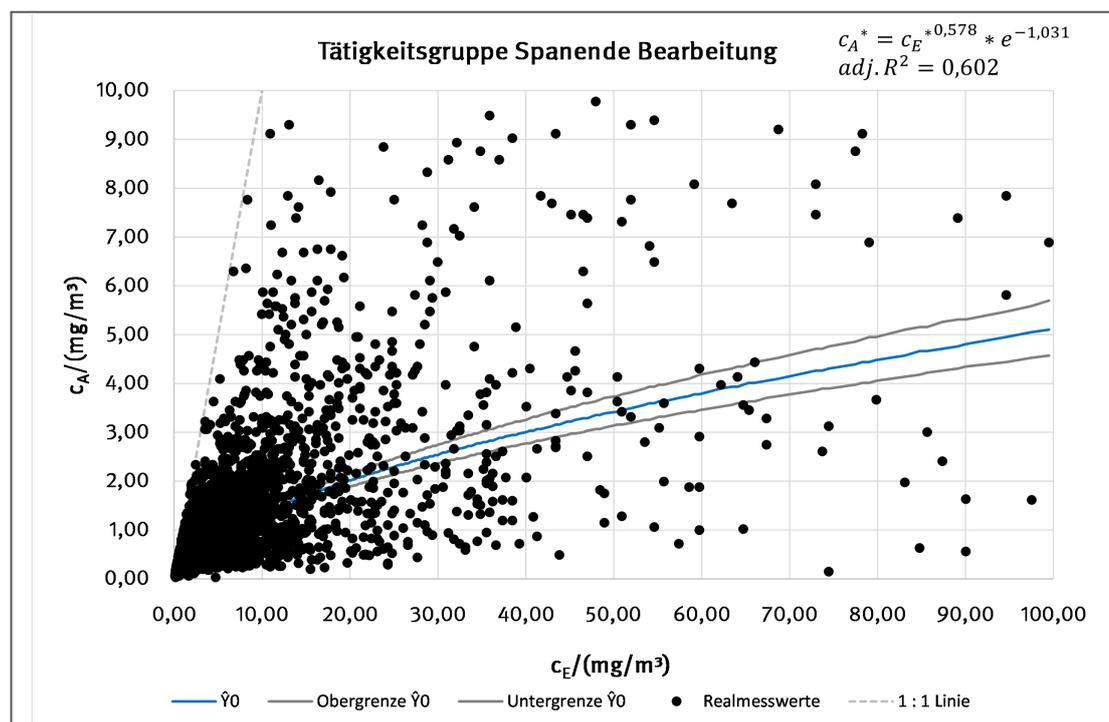


Abbildung 7.6:

Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: *Umformen* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 1\,348$

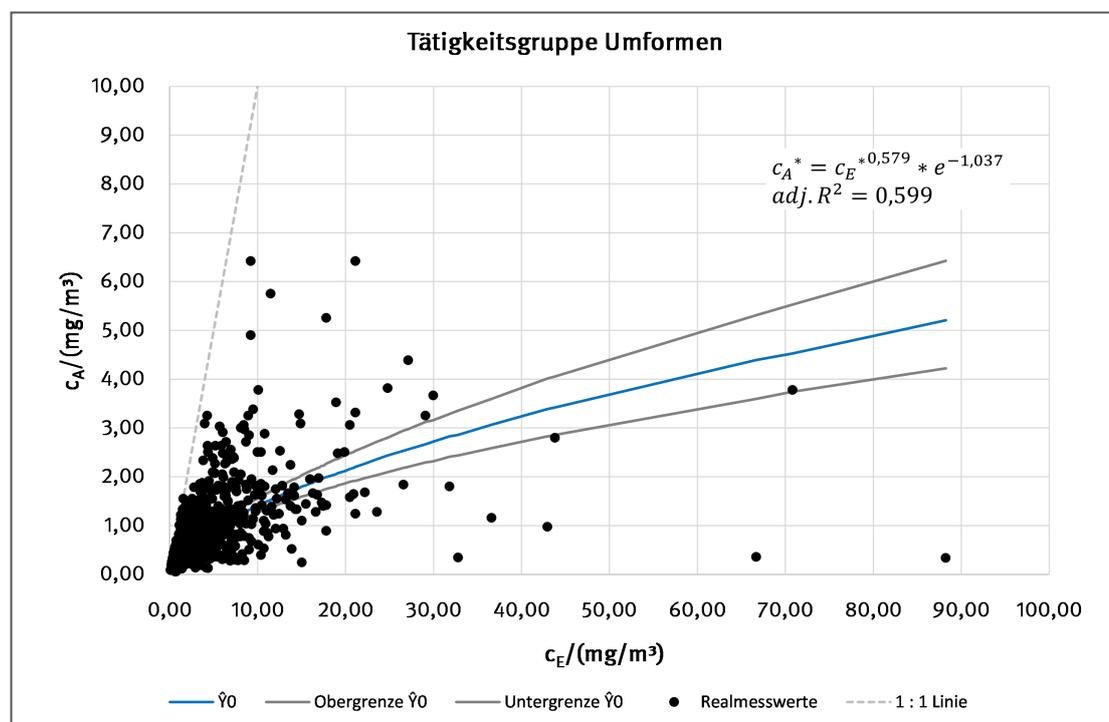


Abbildung 7.7:
 Streudiagramm Tätigkeitsgruppe: *Sonstige* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 2\,974$

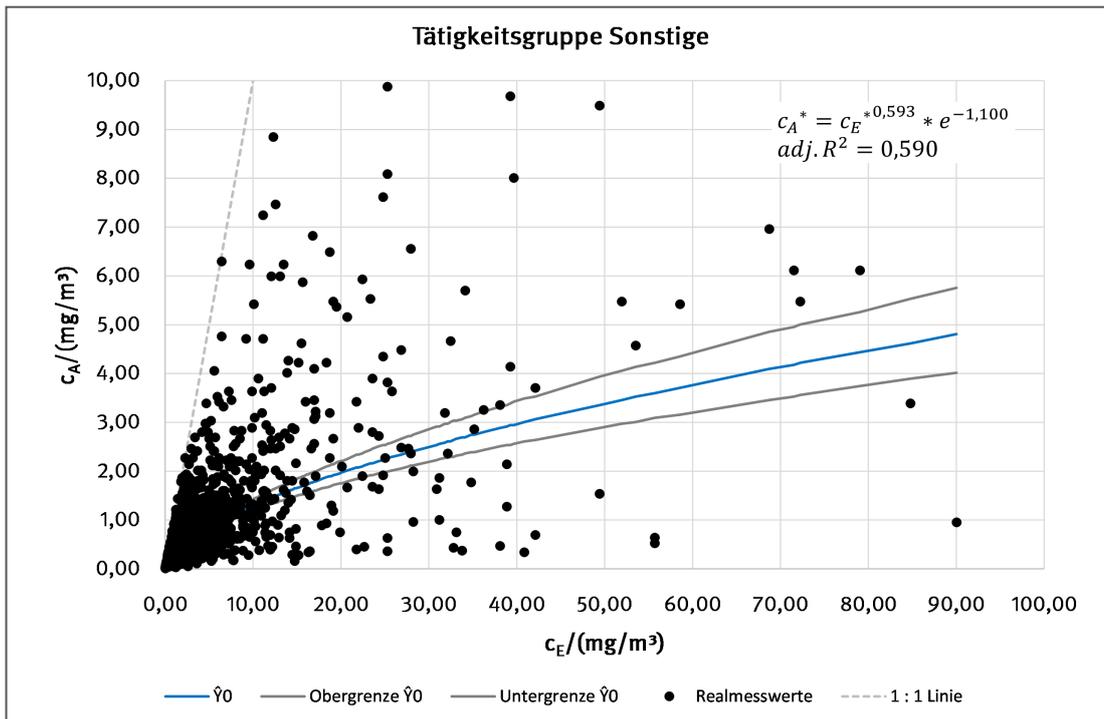


Abbildung 7.8:
 Streudiagramm Materialgruppe A: *Mineralstaub-dominiert/Sonstige* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95-%-Konfidenzintervall; $n = 9\,315$

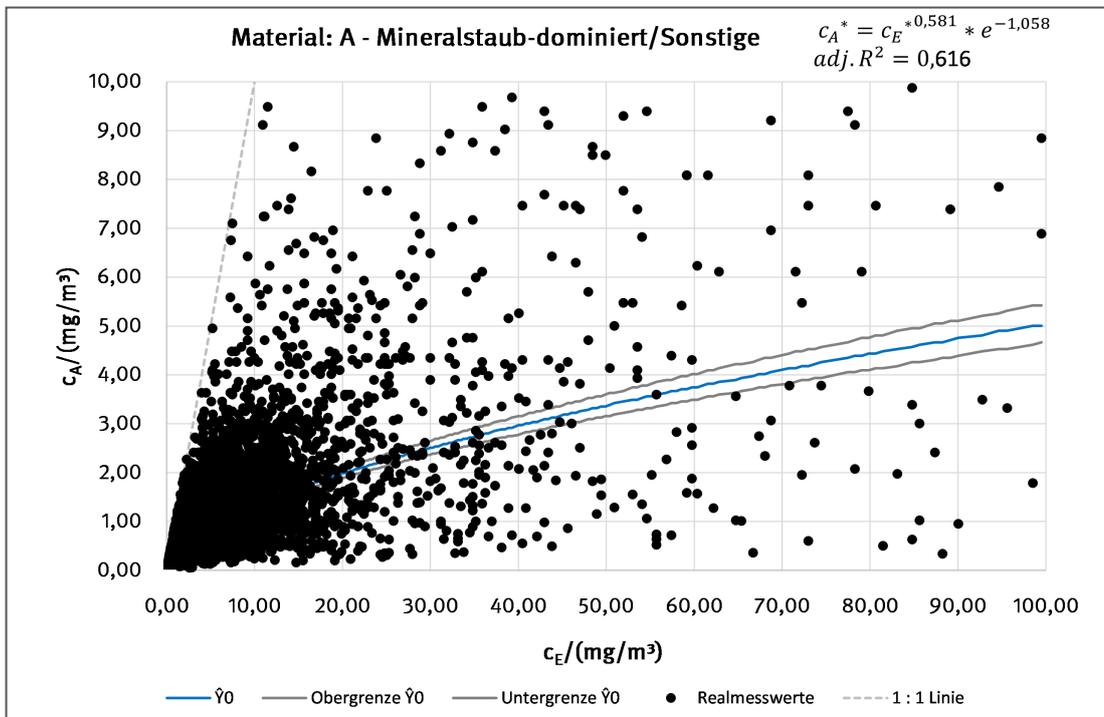


Abbildung 7.9:
 Streudiagramm Materialgruppe B: *Metallstaub-dominiert* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 5\,269$

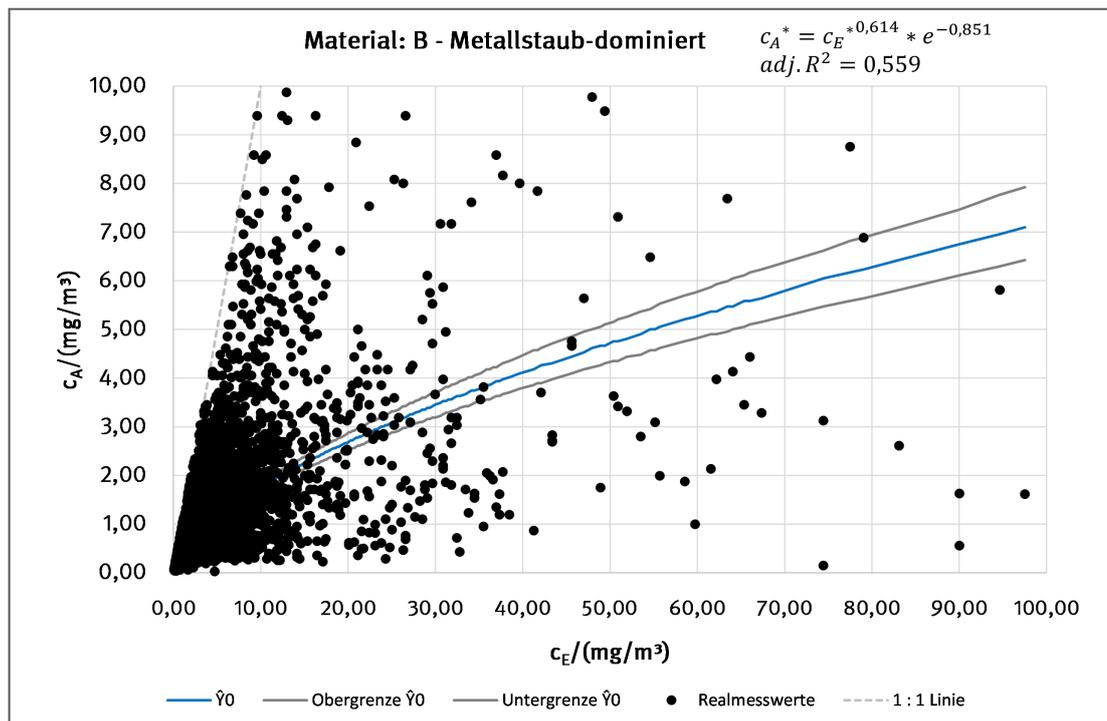


Abbildung 7.10:
 Streudiagramm Materialgruppe C: *Faser-dominiert* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 536$

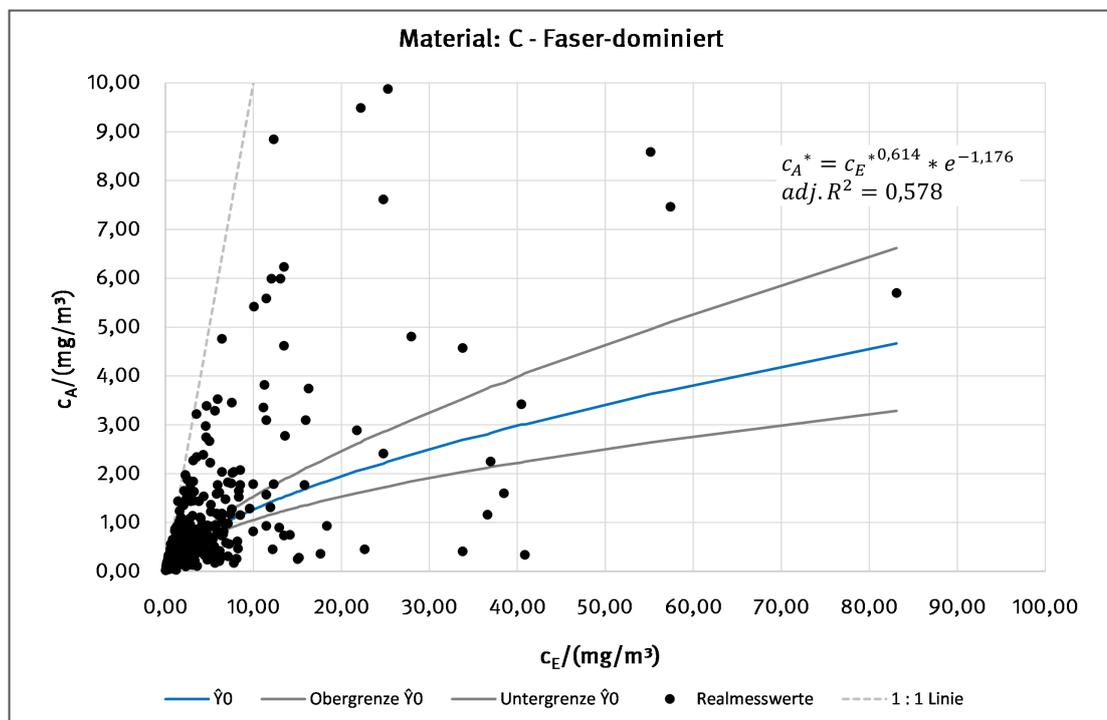


Abbildung 7.11:

Streudiagramm Kombinationsgruppe 1-AC: *Oberflächenbearbeitung/Mineralstaub/Faserstaub-dominiert* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 553$

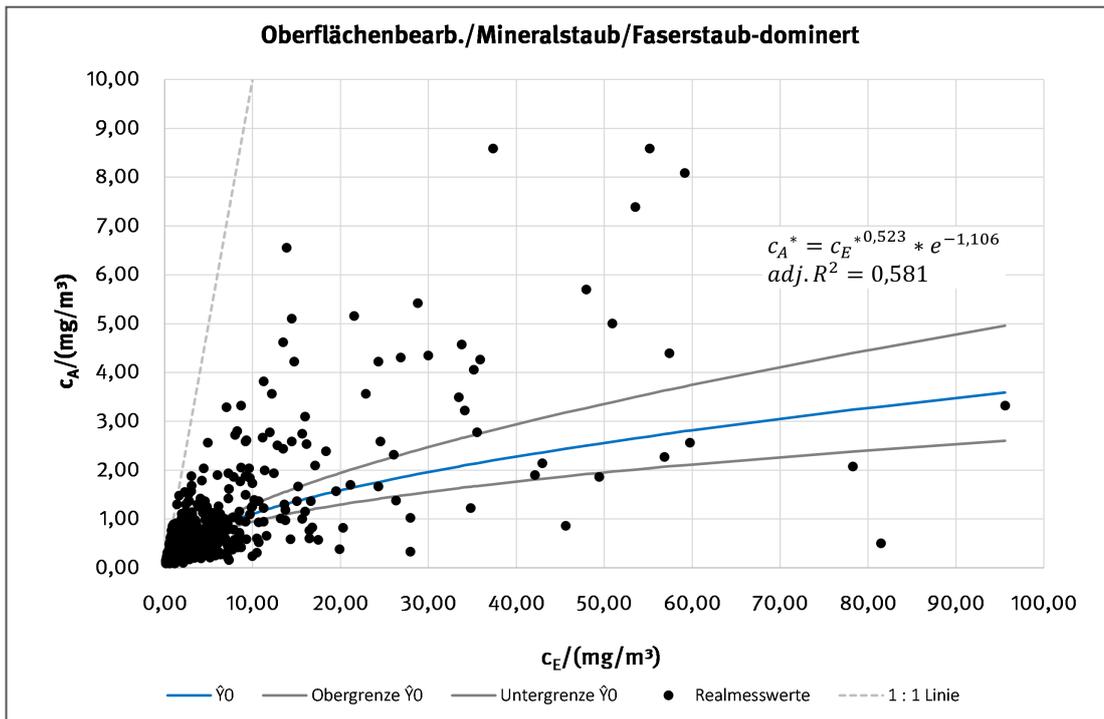


Abbildung 7.12:

Streudiagramm Kombinationsgruppe 2-B: *Heißverarbeitung/Metallstaub-dominiert* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 2\ 265$

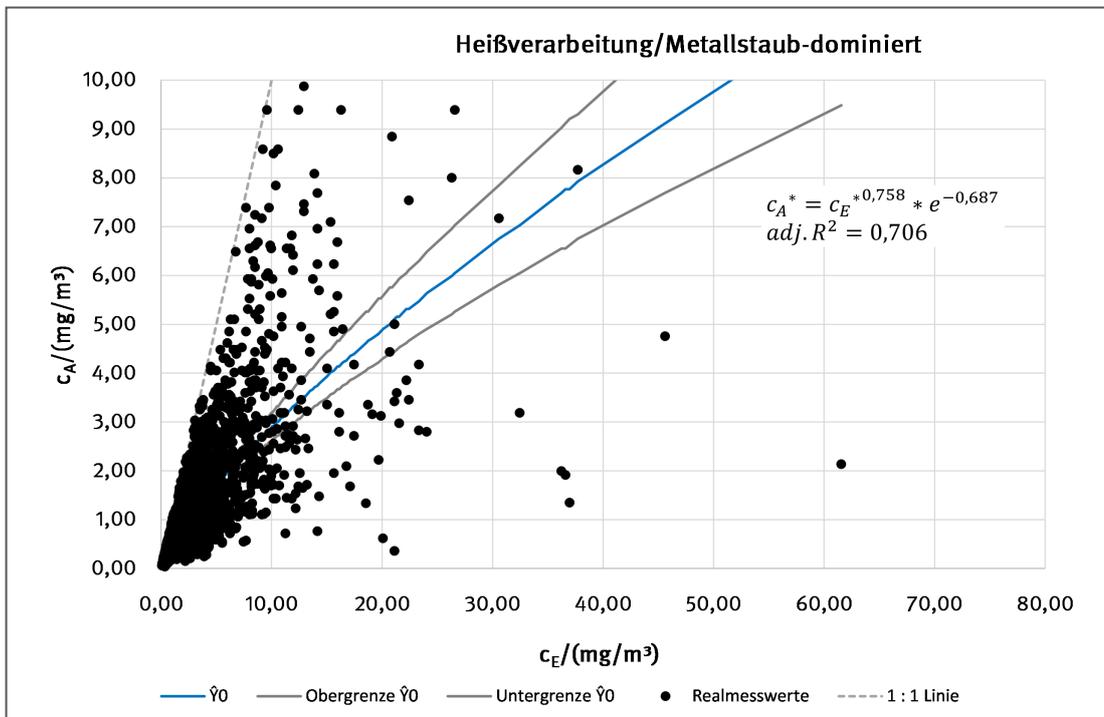


Abbildung 7.13:

Streudiagramm Kombinationsgruppe 4-A: *Spanende Bearbeitung/Mineralstaub-dominiert* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 2\,632$

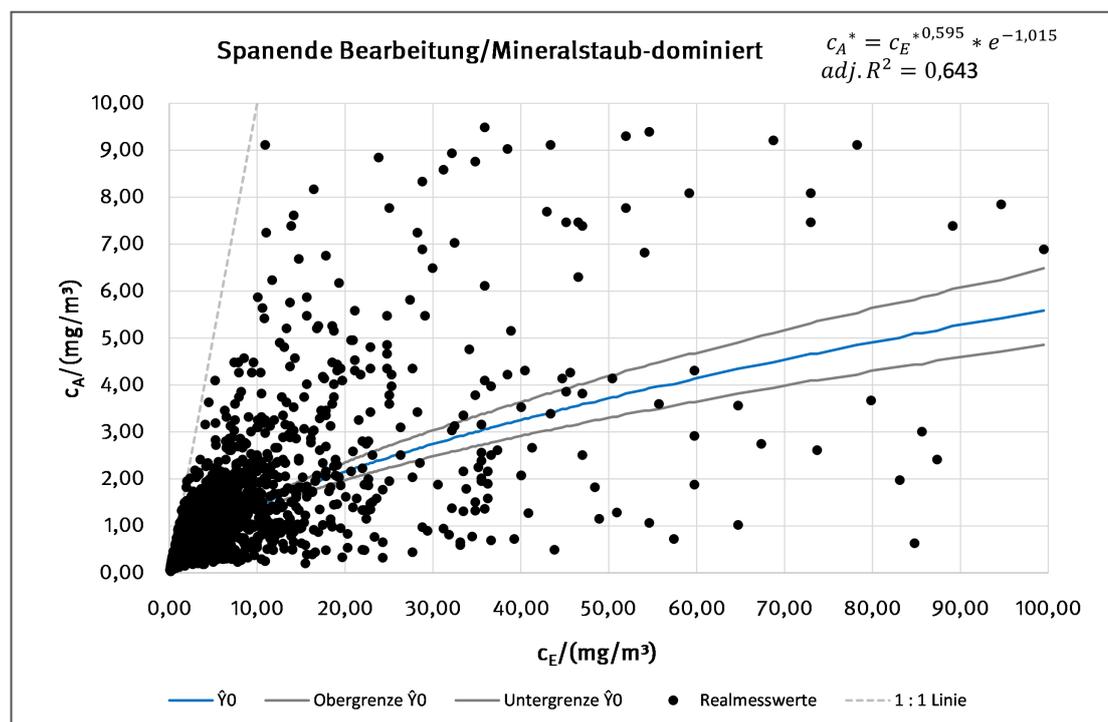


Abbildung 7.14:

Streudiagramm Kombinationsgruppe 6-BC: *Sonstige/Metallstaub/Faser-dominiert/Sonstige* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 548$

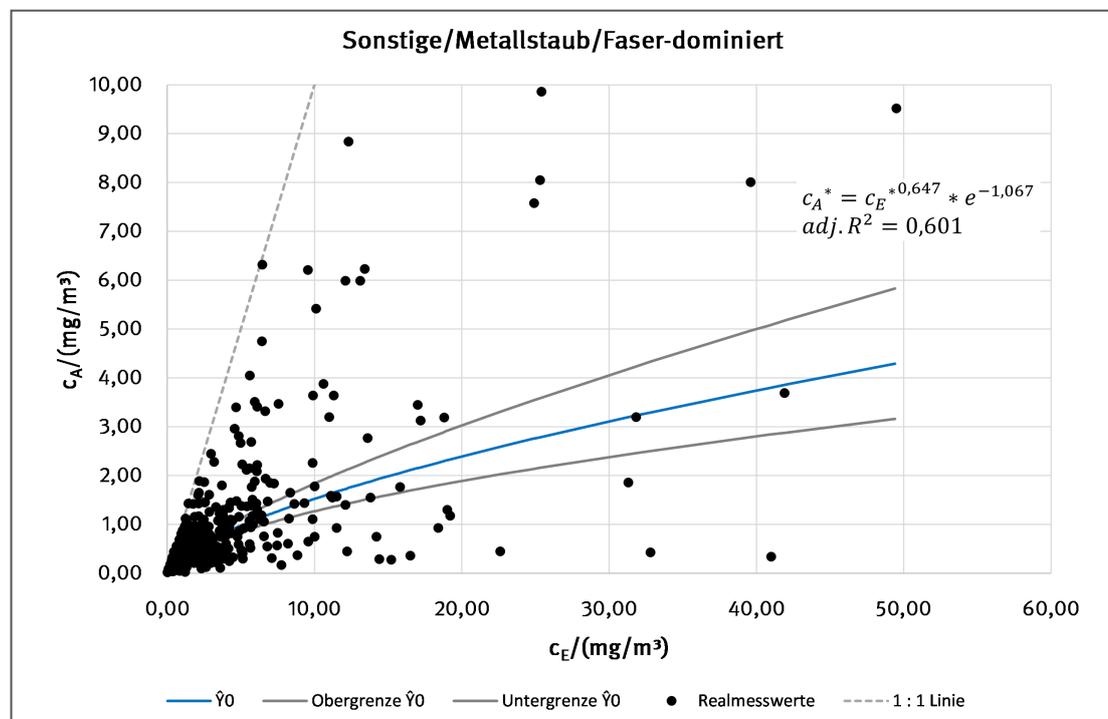


Abbildung 7.15:
Streudiagramm *Löten* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 34$

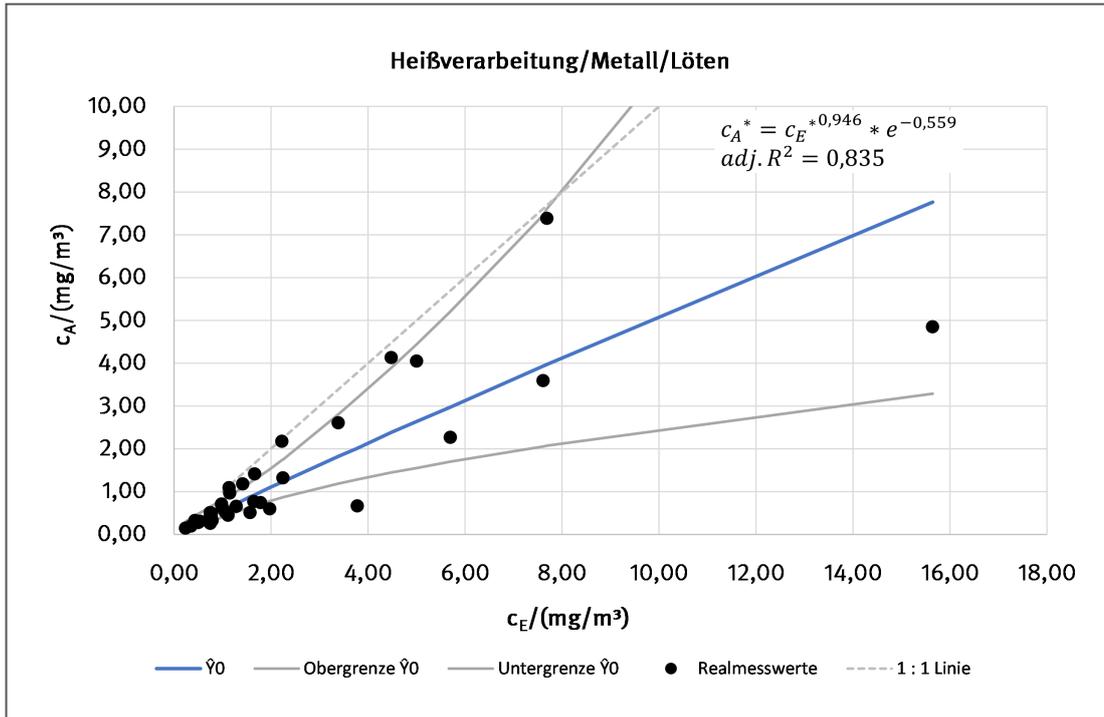


Abbildung 7.16:
Streudiagramm *Gießen (Metall)* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 77$

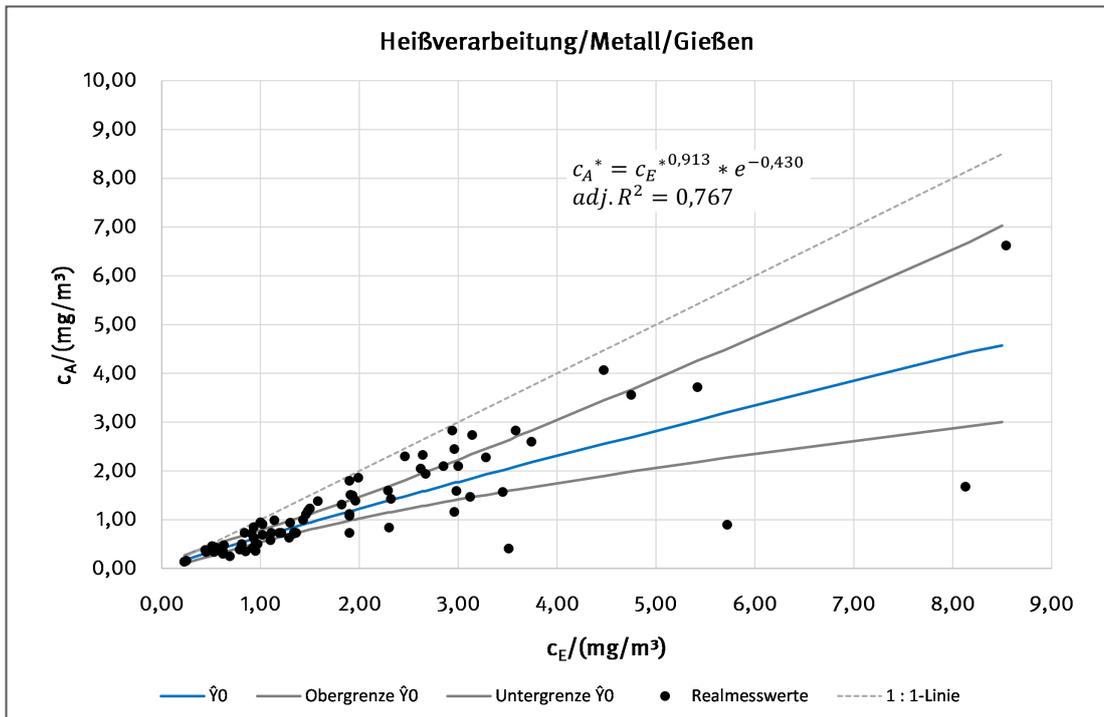


Abbildung 7.17:
 Streudiagramm *Schweißen* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 1126$

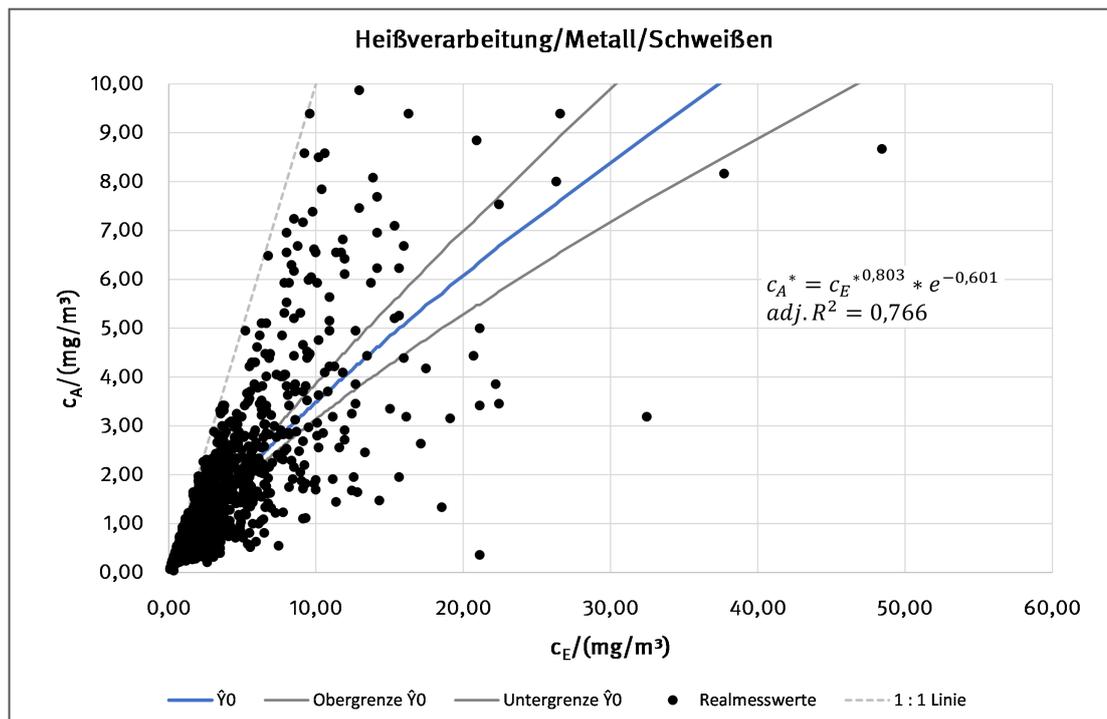


Abbildung 7.18:
 Streudiagramm *Sägen (mineralisch)* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 54$

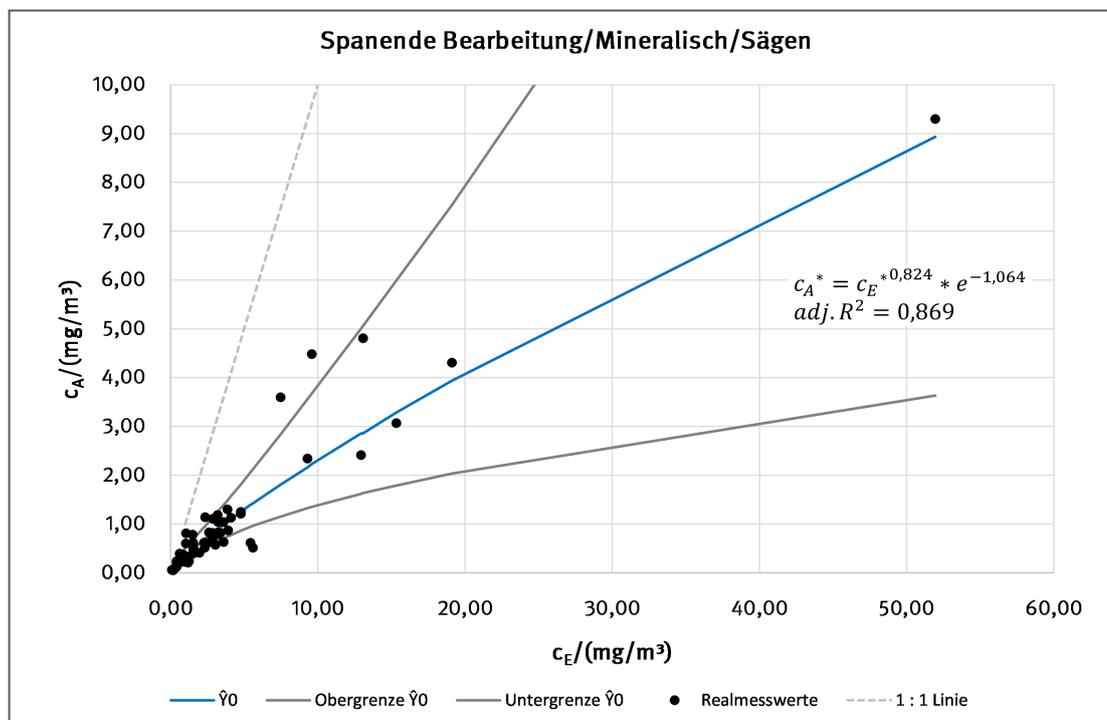


Abbildung 7.19:

Streudiagramm *Hochtemperaturschneiden* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall;
 $n = 176$

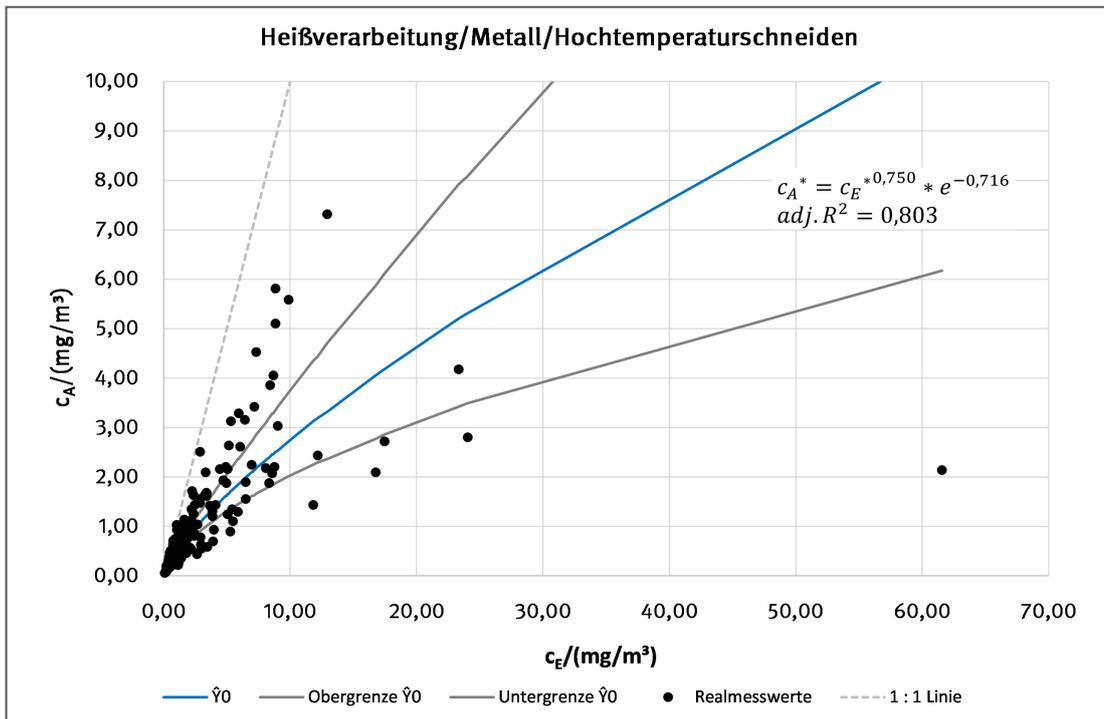


Abbildung 7.20:

Streudiagramm *Schleifen (mineralisch)* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall;
 $n = 107$

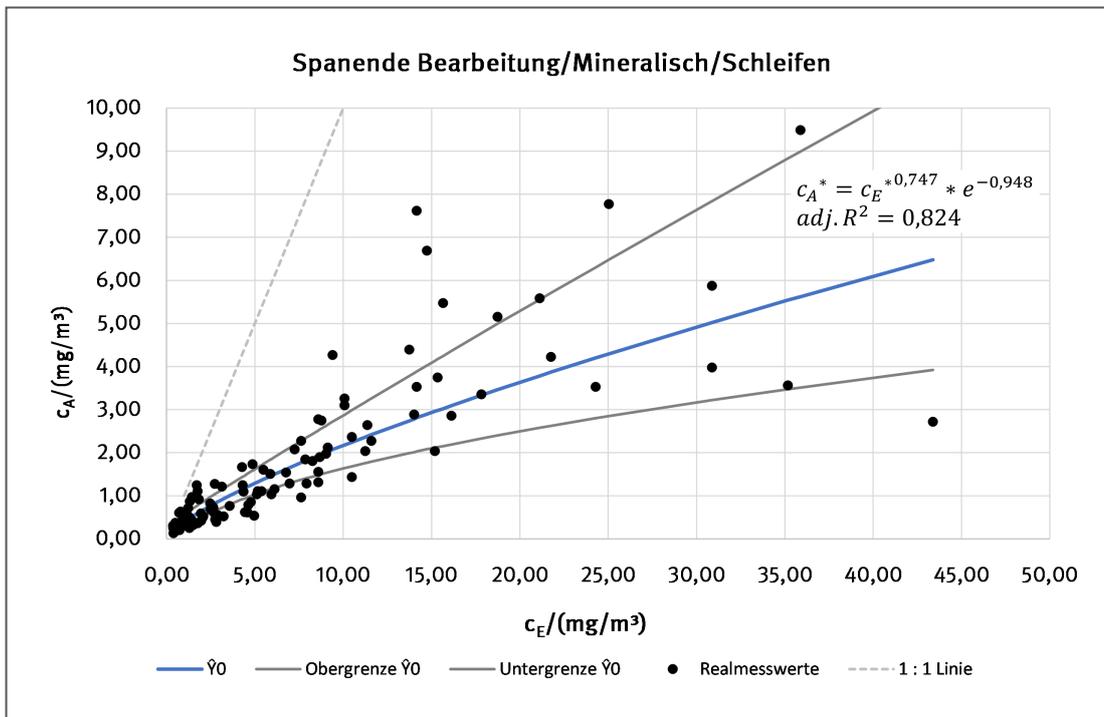


Abbildung 7.21: Streudiagramm *Walzen* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 35$

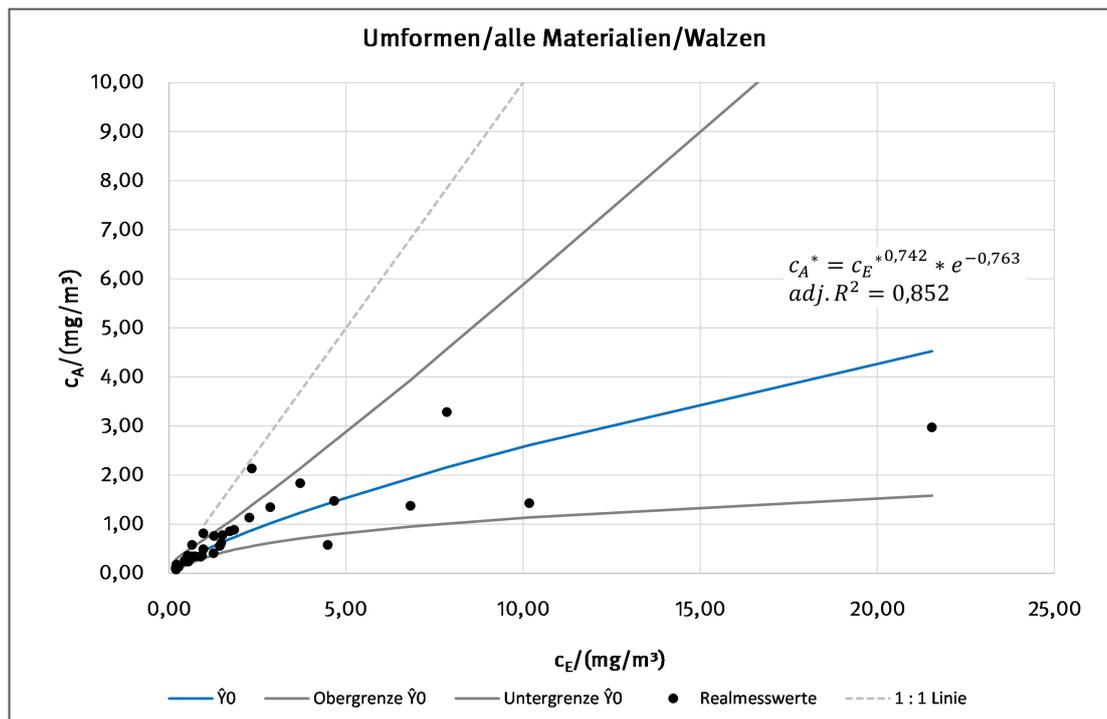


Abbildung 7.22: Streudiagramm *Strahlen* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 57$

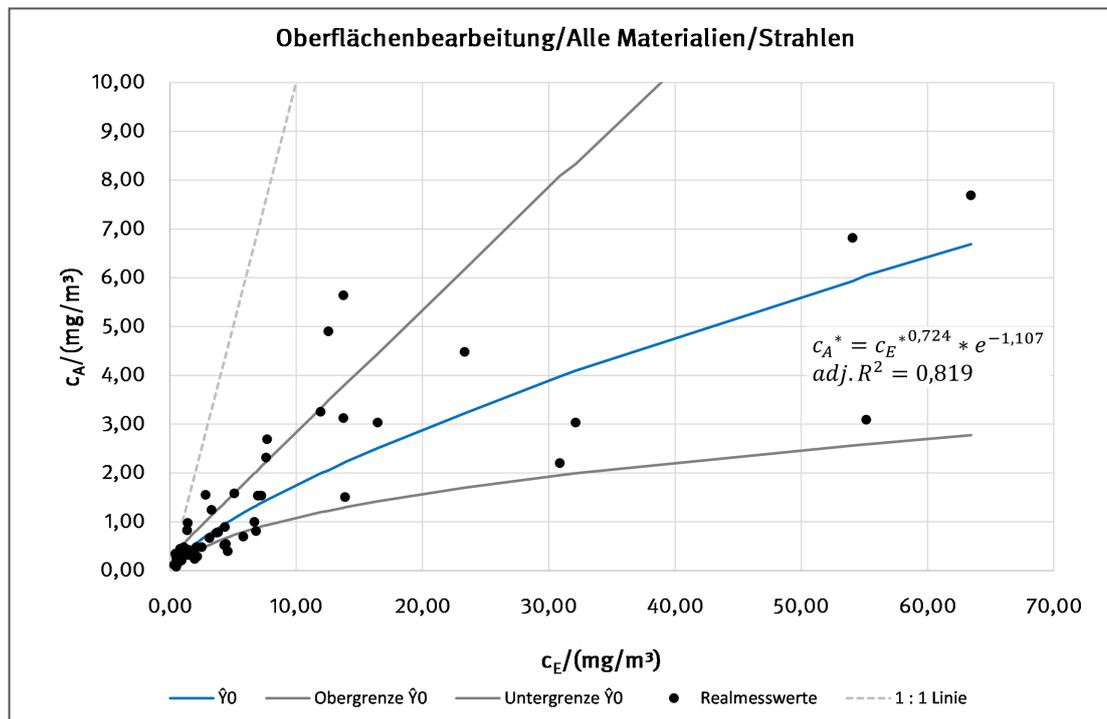


Abbildung 7.23:

Streudiagramm *Meißeln, Bossieren, Stemmen* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall;
 $n = 41$

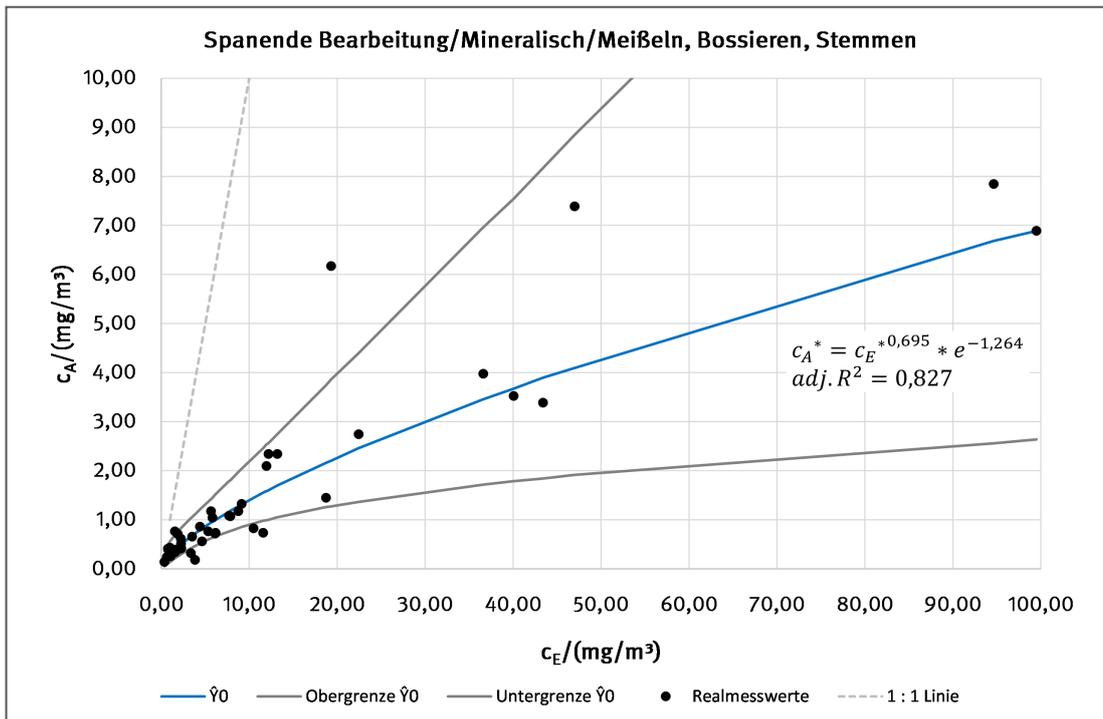


Abbildung 7.24:

Streudiagramm *Drahtziehen* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall;
 $n = 61$

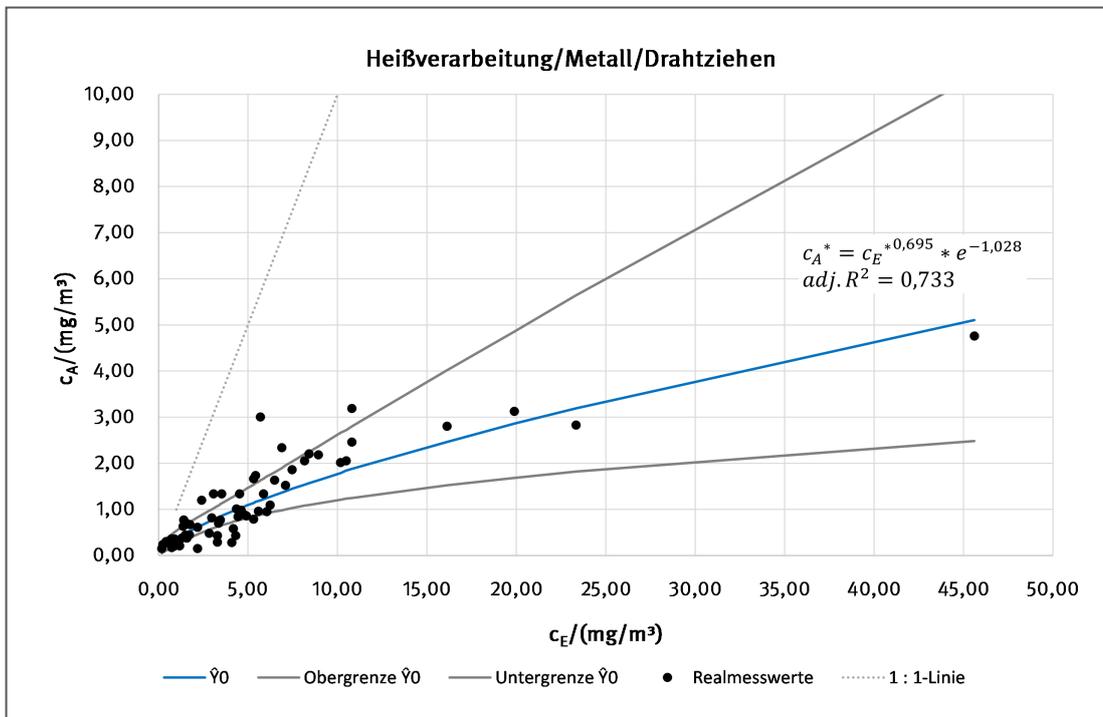


Abbildung 7.25:

Streudiagramm *Wiegen (mineralisch)* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 98$

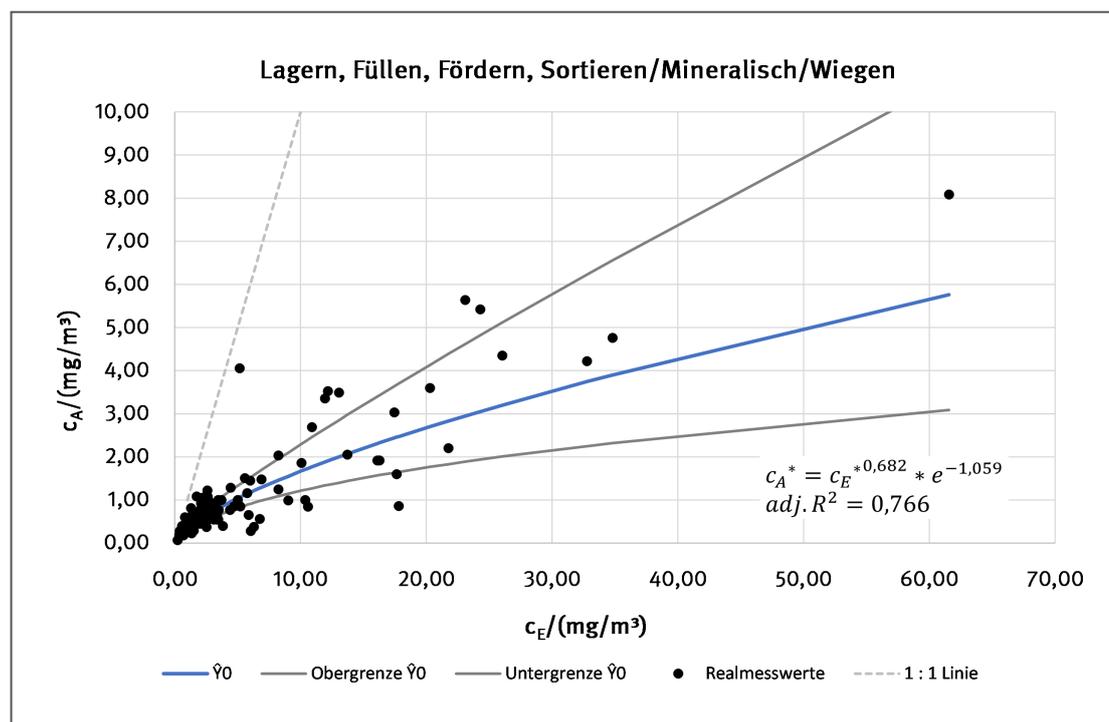


Abbildung 7.26:

Streudiagramm *Kobalt* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 57$

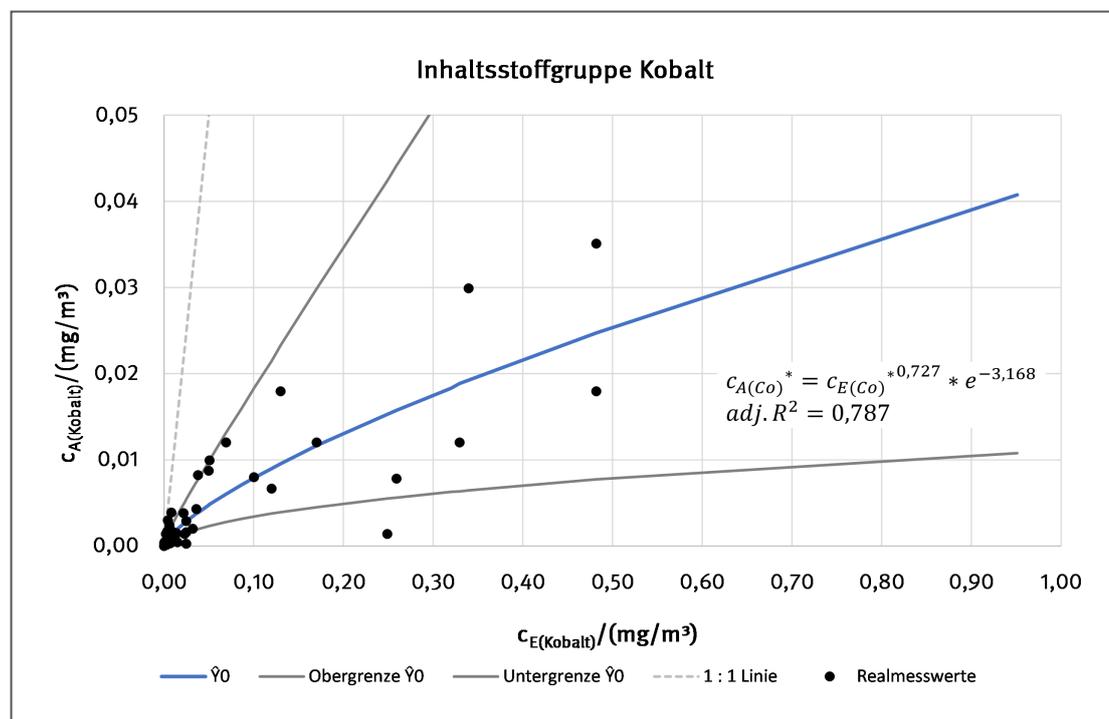


Abbildung 7.27:
Streudiagramm *Mangan* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 111$

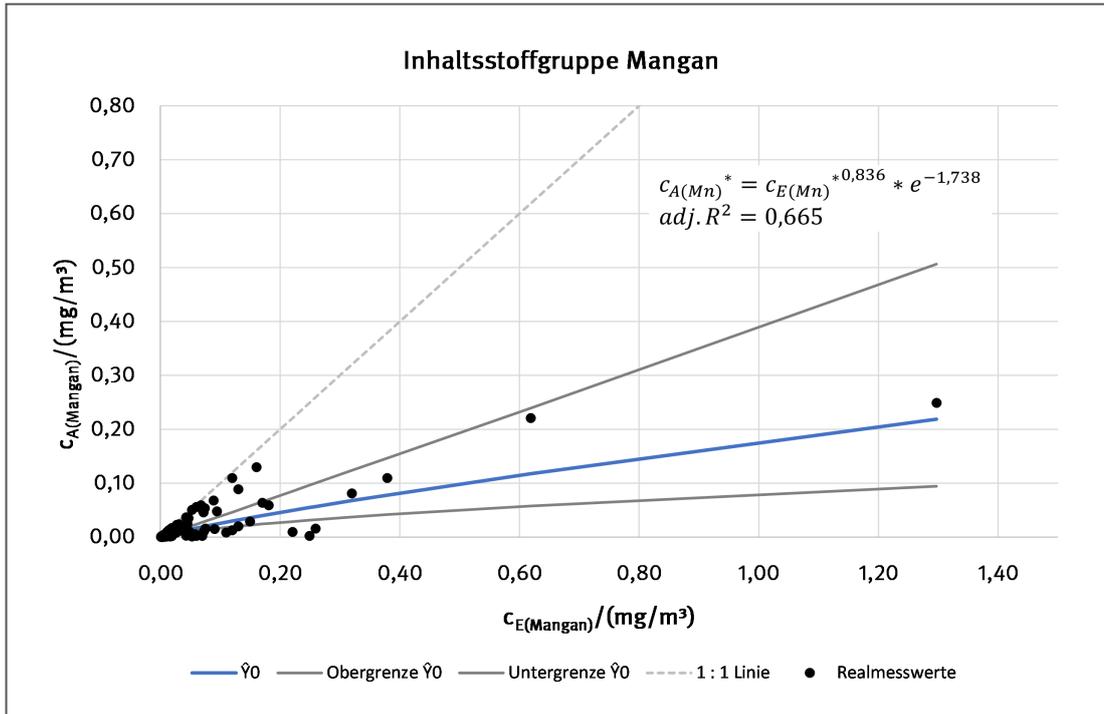
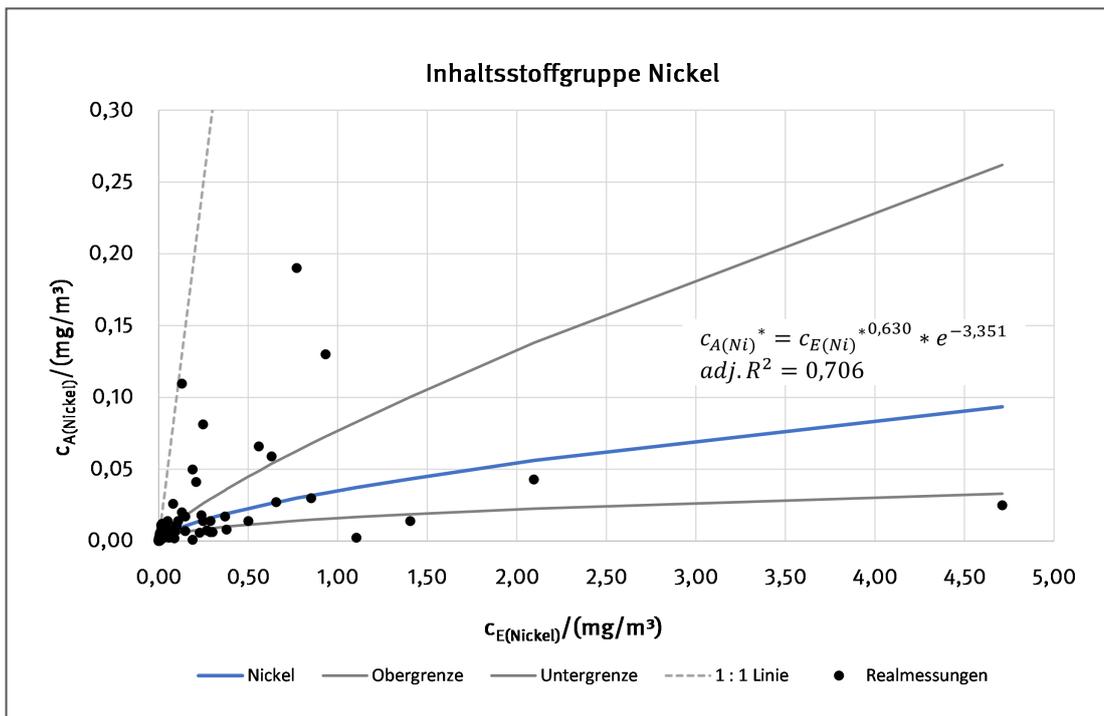


Abbildung 7.28:
Streudiagramm *Nickel* mit Realmesswerten und Potenztrendlinie mit 95%-Konfidenzintervall; $n = 126$



Die Tabellen 7.1 bis 7.5 zeigen die Anzahl der Staubmessungen mit dem jeweiligen Probennahmesystem in Abhängigkeit von der Tätigkeitsgruppe bzw. die Nutzung der einzelnen Probennahmesysteme durch die Messtechnischen Dienste. Tabelle 7.5 zeigt die niedrigste und höchste gemessene E-Staub-Konzentration, die in der jeweiligen heuristischen Gruppe ermittelt worden ist.

Tabelle 7.1
Anzahl der A-Staub-Messungen je Messsystem und Tätigkeitsgruppe

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
<i>Oberflächenbearbeitung</i>	VC-25 F	255	805
	MPG II	2	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	17	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	19	
	FSP-10	512	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Heißverarbeitung</i>	VC-25 F	691	2 974
	MPG II	0	
	VC-25 I	1	
	PM4 F	70	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	274	
	FSP-10	1 913	
	PGP-EA	20	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	1	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	4	
<i>Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren</i>	VC-25 F	992	3 473
	MPG II	2	
	VC-25 I	1	
	PM4 F	440	
	PAS (Casella T)	1	
	FSP-2	90	
	FSP-10	1 957	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Spanende Bearbeitung</i>	VC-25 F	968	4 640
	MPG II	2	
	VC-25 I	14	
	PM4 F	360	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	161	
	FSP-10	3 134	
	PGP-EA	1	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
<i>Umformen</i>	VC-25 F	716	1348
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	41	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	26	
	FSP-10	565	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Sonstige</i>	VC-25 F	366	1880
	MPG II	1	
	VC-25 I	2	
	PM4 F	260	
	PAS (Casella T)	1	
	FSP-2	52	
	FSP-10	1198	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

Tabelle 7.2
Anzahl der E-Staub-Messungen je Messsystem und Tätigkeitsgruppe

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
<i>Oberflächenbearbeitung</i>	VC-25 G	251	805
	PM4 G	11	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	380	
	GSP-10	163	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Heißverarbeitung</i>	VC-25 G	676	2974
	PM4 G	35	
	PM4 G-D	1	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1810	
	GSP-10	428	
	PGP-EA	19	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	1	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	4	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
<i>Lagern, Füllen, Fördern, Sortieren</i>	VC-25 G	1 028	3 473
	PM4 G	294	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	1	
	GSP	1 440	
	GSP-10	710	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Spanende Bearbeitung</i>	VC-25 G	954	4 640
	PM4 G	301	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	2 563	
	GSP-10	821	
	PGP-EA	1	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Umformen</i>	VC-25 G	719	1 348
	PM4 G	20	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	432	
	GSP-10	177	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
<i>Sonstige</i>	VC-25 G	372	1 880
	PM4 G	169	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	1	
	GSP	765	
	GSP-10	573	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

Tabelle 7.3

Verwendung der E-Staub-Probennahmesysteme durch die Messtechnischen Dienste (MTD)

MTD	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen durch MTD
Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft	VC-25 G	61	515
	PM4 G	12	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	203	
	GSP-10	239	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Elektro Textil Feinmechanik	VC-25 G	0	49
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	49	
	GSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Metall Süd	VC-25 G	93	119
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	21	
	GSP-10	5	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse	VC-25 G	19	1903
	PM4 G	84	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1480	
	GSP-10	320	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege, TAD	VC-25 G	1	13
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	11	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

MTD	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen durch MTD
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik	VC-25 G	47	225
	PM4 G	8	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	79	
	GSP-10	81	
	PGP-EA	1	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Direktion	VC-25 G	0	25
	PM4 G	8	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	15	
	PGP-EA	1	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Regionaldirektion Südwest	VC-25 G	0	18
	PM4 G	2	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	15	
	GSP-10	1	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Holz und Metall	VC-25 G	814	5412
	PM4 G	15	
	PM4 G-D	1	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	3 624	
	GSP-10	934	
	PGP-EA	19	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	1	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	4	
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gast- gewerbe	VC-25 G	0	4
	PM4 G	1	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	0	
	GSP-10	3	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

MTD	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen durch MTD
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie	VC-25 G	109	2605
	PM4 G	577	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	2	
	GSP	1 414	
	GSP-10	503	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation	VC-25 G	7	217
	PM4 G	79	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	21	
	GSP-10	110	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Gemeinde-Unfallversicherungsverband (GUV) Hannover/LUK Niedersachsen	VC-25 G	2	3
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie	VC-25 G	0	11
	PM4 G	2	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	5	
	GSP-10	4	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) Technikum der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemischen Industrie	VC-25 G	0	7
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	4	
	GSP-10	3	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

MTD	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen durch MTD
IFA	VC-25 G	1	3
	PM4 G	1	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau	VC-25 G	0	105
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	5	
	GSP-10	100	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Unfallkasse Nord	VC-25 G	0	1
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	0	
	GSP-10	1	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Unfallkasse Nordrhein-Westfalen	VC-25 G	5	15
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	0	
	GSP-10	10	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Unfallkasse Sachsen-Anhalt	VC-25 G	0	1
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	0	
	GSP-10	1	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

MTD	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen durch MTD
Unfallkasse Thüringen	VC-25 G	0	2
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	2	
	GSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Verwaltungs-Berufs- genossenschaft	VC-25 G	38	55
	PM4 G	1	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	15	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Verwaltungs-Berufs- genossenschaft, Hauptverwaltung	VC-25 G	2791	3747
	PM4 G	4	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	461	
	GSP-10	491	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Verwaltungs-Berufs- genossenschaft, Präventionsstab	VC-25 G	0	52
	PM4 G	25	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	25	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Keine Angabe	VC-25 G	12	12
	PM4 G	0	
	PM4 G-D	0	
	G-Viellochkopf	0	
	GSP	1	
	GSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

Tabelle 7.4

Verwendung der A-Staub-Probennahmesystem durch die Messtechnischen Dienste (MTD)

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft	VC-25 F	60	515
	MPG II	0	
	VC-25 I	4	
	PM4 F	73	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	63	
	FSP-10	315	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Elektro Textil Feinmechanik	VC-25 F	0	49
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	49	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Metall Süd	VC-25 F	108	119
	MPG II	2	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	2	
	FSP-10	7	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse	VC-25 F	51	1903
	MPG II	1	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	99	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	16	
	FSP-10	1736	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege, TAD	VC-25 F	1	13
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	1	
	PAS (Casella T)	0	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
	FSP-2	0	
	FSP-10	11	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik	VC-25 F	10	225
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	58	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	2	
	FSP-10	155	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Direktion	VC-25 F	1	25
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	10	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	13	
	PGP-EA	1	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Regionaldirektion Südwest	VC-25 F	0	18
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	4	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	1	
	FSP-10	13	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Holz und Metall	VC-25 F	890	5 412
	MPG II	0	
	VC-25 I	2	
	PM4 F	29	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	422	
	FSP-10	4 044	
	PGP-EA	20	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	1	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	4	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gast- gewerbe	VC-25 F	0	4
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	1	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	3	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie	VC-25 F	122	2 605
	MPG II	2	
	VC-25 I	1	
	PM4 F	626	
	PAS (Casella T)	2	
	FSP-2	111	
	FSP-10	1 741	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Berufsgenossenschaft Verkehrswirtschaft Post- Logistik Telekommunika- tion	VC-25 F	0	217
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	163	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	54	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Gemeinde-Unfallversiche- rungsverband (GUV) Han- nover/LUK Niedersachsen	VC-25 F	2	3
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	1	
	FSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
IGF der BG Rohstoffe und chemische Industrie	VC-25 F	0	11
	MPG II	2	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	1	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	8	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
IGF-Technikum der BG Rohstoffe und chemischen Industrie	VC-25 F	0	7
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	7	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
	IFA	VC-25 F	0
MPG II		0	
VC-25 I		0	
PM4 F		2	
PAS (Casella T)		0	
FSP-2		0	
FSP-10		1	
PGP-EA		0	
PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm		0	
PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm		0	
Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau		VC-25 F	0
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	1	
	FSP-10	104	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
	Unfallkasse Nord	VC-25 F	0
MPG II		0	
VC-25 I		0	
PM4 F		1	
PAS (Casella T)		0	
FSP-2		0	
FSP-10		0	
PGP-EA		0	
PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm		0	
PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm		0	
Unfallkasse NRW		VC-25 F	3
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	2	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	10	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Unfallkasse Sachsen-Anhalt	VC-25 F	0	1
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	1	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Unfallkasse Thüringen	VC-25 F	0	2
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	2	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Verwaltungs-Berufsgenossenschaft	VC-25 F	33	55
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	5	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	17	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, Hauptverwaltung	VC-25 F	2 695	3 747
	MPG II	0	
	VC-25 I	11	
	PM4 F	86	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	2	
	FSP-10	953	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

Tätigkeitsgruppe	PS	Anzahl	Gesamtanzahl an Messungen je Gruppe
Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, Präventionsstab	VC-25 F	0	52
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	27	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	25	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	
Keine Angabe	VC-25 F	12	12
	MPG II	0	
	VC-25 I	0	
	PM4 F	0	
	PAS (Casella T)	0	
	FSP-2	0	
	FSP-10	0	
	PGP-EA	0	
	PGP-EA mit Adapter für Schweißerschutzschirm	0	
	PGP-EA, Komplettsystem für Schweißerschutzschirm	0	

Tabelle 7.5:
Niedrigste und höchste E-Staub-Konzentrationsmesswerte, die in den einzelnen heuristischen Gruppen berücksichtigt worden sind

Gruppe	$c_{E(\min)} / \text{mg}^{-3}$	$c_{E(\max)} / \text{mg}^{-3}$
Löten	0,34	63,2
Gießen (Metall)	0,35	99,9
Schweißen	0,18	45,6
Sägen (mineralisch)	0,22	61,7
Hochtemperaturschneiden	0,08	61,4
Schleifen (mineralisch)	0,20	78,5
Walzen	0,19	21,6
Strahlen	0,34	63,2
Meißeln, Bossieren, Stemmen	0,35	99,9
Drahtziehen	0,18	45,6
Wiegen (mineralisch)	0,22	61,7

8 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. 1999-08. WHO/SDE/OEH/99.14. Hrsg.: World Health Organization (WHO), Genf, Schweiz 1999. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/66147> (Zugriff: 3.7.2020)
- [4] *Ickert, F.*: Staublunge und Tuberkulose bei den Bergleuten des Mansfelder Kupferschieferbergbaues. Deut. Med. Wochenschr. 50 (1924), S. 832-834.
- [5] *Rüttner, J. R.; Bovent, P.; Aufdermaur, M.*: Graphit, Carborund, Staublunge. Deut. Med. Wochenschr. 77 (1952), S. 1413-1415.
- [6] *Nordmann, M.*: Die Staublunge der Kieselgurarbeiter. Virchows Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin 311 (1943) Nr. 1, S. 116-148.
- [7] *Lundgren, K. D.; Öhmann, H.*: Pneumokoniose in der Hartmetallindustrie. Virchows Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin 325 (1954) Nr. 3, S. 259-284.
- [8] *Hoffmeyer F.; van Kampen, V.; Brüning, T.; Merget, R.*: Pneumokoniosen. Pneumologie 61 (2007) Nr. 12, S. 774-790.
- [9] *Schroeder, H.-G.; Kleinsasser, O.; Wolf, J.*: Adenokarzinome der Nasenhaupt- und Nasennebenhöhlen durch Stäube von Eichen- und Buchenholz. Dtsch. Ärztebl. 86 (1989), S. 2462-2469
- [10] *Gillissen, A.; Gessner, C.; Hammerschmidt, S.; Hoheisel, G.; Wirtz, H.*: Gesundheitliche Bedeutung inhalierter Stäube. Deut. Med. Wochenschr. 131 (2006) Nr. 12, S. 639-644
- [11] *Verma, D. K.*: Inhalable, total and respirable dust: A field study. Ann. Occup. Hyg. 28 (1984) Nr. 2, S. 163-172
- [12] Maximale Arbeitsschutzkonzentrationen 1973. Arbeitsschutz 9 (1973), S. 366
- [13] *Tsai, P. J.; Vincent, J. H.; Wahl, G.; Maldonado, G.*: Occupational exposure to inhalable and total aerosol in the primary nickel production industry. Occup. Environ. Med. 52 (1995) Nr. 12, S. 793-799
- [14] *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
- [15] *Vinzents, 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. 795-800
- [16] *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
- [17] *Lillienberg, L.; Brisman, J.*: Flour dust in bakeries – a comparison between methods. Ann. Occup. Hyg. 38 (1994), S. 571-575
- [18] *Martin, J. R.; Zalk, D. M.*: Comparison of total dust/inhalable dust sampling methods for the evaluation of airborne wood dust. Appl. Occup. Environ. Hyg. 13 (1998) Nr. 3, S. 177-182
- [19] *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 (2007) Nr. 1, S. 28-35
- [20] *Lidén, G.; Melin, B.; Lidblom, A.; Lindberg, K.; Norén, J. O.*: Personal sampling in parallel with open-face filter cassettes and IOM samplers for inhalable dust-implications for occupational exposure limits. Appl. Occup. Environ. Hyg. 15.3 (2000), S. 263-276
- [21] *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 Wismut. Int. Arch. Occup. Environ. Health 81 (2008) Nr. 8, S. 949-958
- [22] *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

- [23] *Woskie, S. R.; Kalil, A.; Bello, D.; Abbas Virji, M.:* Exposures to quartz, diesel, dust and welding fumes during heavy and highway construction. *AIHA J.* 63 (2002) Nr. 4, S. 447-457
- [24] *Korczyński, R. E.:* Dust exposures and ventilation control in the crematorium. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 12 (1997) Nr. 2, S. 122-125
- [25] *Lehnert, M.; Pesch, B.; Lotz, A.; Pelzer, J.; Kendzia, B.; Gawrych, K. et al.:* Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fume. *Ann. Occup. Hyg.* 56 (2012) Nr. 5, S. 557-567
- [26] *Okamoto, S.; Nakagoshi, S.; Ukai, H.; Takada, S.; Inui, S.; Higashikawa, K. et al.:* Variation in the ratio of respirable particulates over inhalable particulates by type of dust workplace. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 71 (1998) Nr. 2, S. 111-116
- [27] *Gomes, J.; Loyd, O. L.; Norman, N. J.; Pahwa, P.:* Dust exposure and impairment of lung function at a small iron foundry in a rapidly developing country. *Occup. Environ. Med.* 58 (2001) Nr. 10, S. 656-662
- [28] *Järvelä, M.; Huvinen, M.; Viitanen, A.-K.; Kanerva, T.; Vanhala, E.; Uitti, J. et al.:* Characterization of particle exposure in ferrochromium and stainless steel production. *J. Occup. Environ. Hyg.* 13 (2016) Nr. 7, S. 558-568
- [29] *Burdorf, A.; Lillienberg, L.; Brisman, J.:* Characterization of exposure to inhalable four dust in Swedish bakeries. *Ann. Occup. Hyg.* 38 (1994) Nr. 1, S. 67-78
- [30] *Ojima, J.:* Efficiency of a tool-mounted local exhaust ventilation system for controlling dust exposure during metal grinding operations. *Ind. Health* 45 (2007) Nr. 6, S. 817-819
- [31] *Akbar-Khanzadeh, F.; Brillhart, R. L.:* Respirable crystalline silica dust exposure during concrete finishing (grinding) using hand-held grinders in the construction industry. *Ann. Occup. Hyg.* 46 (2002) Nr. 3, S. 341-346
- [32] *Kos, A.; Beljo-Lucic, R.; Segal, K.; Rapp, A. O.:* Influence of woodworking machine cutting parameters on the surrounding air dustiness. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62 (2004) Nr. 3, S. 169-176
- [33] *Flanagan, M. E.; Seixas, N.; Majar, M.; Camp, J.; Morgan, M.:* Silica dust exposures during selected construction activities. *AIHA J.* 64 (2003) Nr. 3, S. 319-328
- [34] *Frost, J.:* Einfache lineare Regression. Springer VS essentials, 2018
- [35] *Ancombe, F. J.:* Graphs in statistical analysis. *Am. Stat.* 27 (1973) Nr. 1, S. 17-21
- [36] DIN EN 13205-2: Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sammlern für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikel – Teil 2: Laborprüfung der Leistungsfähigkeit basierend auf der Bestimmung des Probenahme- wirkungsgrads (9/2014). Beuth, Berlin 2014
- [37] *Bender, H. F.:* Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen, Sachkunde für Naturwissenschaftler. 3. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2005
- [38] *Mattenkloft, M.; Höfert, N.:* Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 69 (2009) Nr. 4, S. 127-129
- [39] *Calvert, G. M.; Rice, F. L.; Boiano, J. M.; Sheeje, J. W.; Sanderson, W. T.:* Occupational silica exposure and risk of various diseases: an analysis using death certificates from 27 states of the United States. *Occup. Environ. Med.* 60 (2003) Nr. 2, S. 122-129
- [40] *Beckett, W. S.:* Occupational respiratory diseases. *N. Engl. J. Med.* 342 (2000) Nr. 6, S. 406-413
- [41] *Husten, K.:* Die Abhängigkeit der chronischen Bronchitis und des Lungenemphysems von der Lungenverstaubung und der Silikose. *Die Staublungerkrankungen – Wissenschaftliche Forschungsberichte* 3. Springer 1958, S. 396-414
- [42] *Müller-Quernheim, J.; Gaede, K. I.; Prasse, A.; Zissel, G.:* Chronische Berylliose. *Pneumologie* 61 (2007), S. 109-116
- [43] *Voigtman, S.:* Über das Vorkommen von Siderosen bei Walzern. *Int. Arch. Occup. Environ. H* 14 (1956) Nr. 3, S. 260-268
- [44] *Baur, X.:* Arbeitsmedizin – Berufskrankheiten der 4er-Gruppe der BKV-Anlage (Atemwege/Lunge). Springer, Heidelberg 2013, S. 123-135
- [45] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen (TRGS 561). *Ausg.* 10/2017. *GMBL.* (2017) Nr. 43, S. 786-812

- [46] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen (TRGS 910). *Ausg. 2/2014*. GMBL. (2014) Nr. 12, S. 258-270; *zul. geänd.* GMBL. (2019) Nr. 7, S. 120
- [47] *Ramazzini, B.*: Diseases of bakers and millers. In: *Wright, W. C.* (Hrsg.): *Disease of workers – De Morbis Artificum*. Hafner Publishing Company, New York, USA 1713, S. 225-235
- [48] MAK-Werte 1968. *Arbeitsschutz* (1958) Nr. 12, S. 341
- [49] Technische Regeln für gefährliche Arbeitsstoffe: MAK-Werte 1983 (TRgA 900). *BArbBl.* (1983) Nr. 10, S. 45
- [50] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz – Luftgrenzwerte (TRGS 900). *BArbBl.* (2001) Nr. 9, S. 86
- [51] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). *BArbBl.* (2006) Nr. 1, S. 41
- [52] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). GMBL. (2014) Nr. 12, S. 271
- [53] *Barig, A.*; *Blome, H.*: Allgemeiner Staubgrenzwert, Teil 1: Allgemeines. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 59 (1999) Nr. 7/8, S. 261-265.
- [54] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Blei (TRGS 505). *Ausg. 2/2007*. GMBL. (2007) Nr. 12, S. 254
- [55] *Gabriel, S.*; *Van Gelder, R.*; *Stamm, R.*; *Koppisch, D.*; *Arnone, M.*; *Koch, U.*: Drei Millionen Datensätze in der Expositionsdatenbank MEGA. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 76 (2016) Nr. 11/12, S. 422-424
- [56] *Gabriel, S.*; *Koppisch, D.*; *Range, D.*: The MGU – a monitoring system for the collection and documentation of valid workplace exposure data. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 70 (2010) Nr. 1/2, S. 43-49
- [57] Das Messsystem Gefährdungsermittlung der UV-Träger (MGU). 8. Aufl. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), Berlin 2013
- [58] *Eickmann, U.*: Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen. *Fortschritte in der Präventiv- und Arbeitsmedizin*. Ecomed Medizin, Landsberg am Lech 2008
- [59] DIN EN 689: Anleitung zur Ermittlung der inhalativen Exposition gegenüber chemischen Stoffen zum Vergleich mit Grenzwerten und Meßstrategie (4/1995). Beuth, Berlin 1995
- [60] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). *Ausg. 2/2010*. GMBL. (2010) Nr. 12, S. 231-253; *zul. geänd.* GMBL. (2016) Nr. 43, S. 843-846
- [61] *Siekmann, H.*: Geräte zur Probenahme der alveolengängigen Staubfraktion (A-Staub) (Kennzahl 3020). Lfg. 21/1998. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Berlin. Erich Schmidt 1989 – *Losebl.-Ausg.* www.ifa-arbeitsmappedigital.de/3020. Verfügbar am: 7.5.2019
- [62] Arbeitsanweisung für den Umgang mit dem Gefahrstoffmessgerät VC 25 und für die Kalibrierung des Messsystems mit dem Kalibriersystem PRKAL 450. *Qualitätsmanagement im MGU 3.1* (2017)
- [63] *Riediger, G.*: Geräte zur Probenahme der einatembaren Staubfraktion (E-Staub) (Kennzahl 3010). Lfg. 27/2001. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Berlin. Erich Schmidt 1989 – *Losebl.-Ausg.* www.ifa-arbeitsmappedigital.de/3020. www.ifa-arbeitsmappedigital.de/3010. Verfügbar am: 7.5.2019
- [64] Arbeitsanweisung für den Umgang mit dem Gefahrstoffmessgerät PM 4 (-2) und für die Kalibrierung des Messsystems mit dem Kalibriersystem PRKAL 100. *Qualitätsmanagement im MGU 3.1* (2017)
- [65] Arbeitsanweisung für den Einsatz des Feinstaubsammelsystems FSP in Verbindung mit Probenahmepumpen. *Qualitätsmanagement im MGU 2.2* (2017)
- [66] Arbeitsanweisung für den Einsatz des Gesamtstaubsammelsystems GSP in Verbindung mit Probenahmepumpen. *Qualitätsmanagement im MGU 2.1* (2015)
- [67] *Möhlmann, C.*: Simultane personenbezogene Probenahme der E- und A-Fractionen in Schweißarbeiten (Kennzahl 3025). Lfg. 37/2006. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Berlin. Erich Schmidt 1989 – *Losebl.-Ausg.* www.ifa-arbeitsmappedigital.de/3025. Verfügbar am: 2.7.2019
- [68] Arbeitsanweisung für den Einsatz des Staubsammelsystems PGP-EA in Verbindung mit Probenahmepumpen. *Qualitätsmanagement im MGU 2.2* (2017)
- [69] *Thomas, R.*: *Practical Guide to ICP-MS*. Marcel Dekker, New York, USA 2004

- [70] *Gabriel, S.; Koch, U.; Koppisch, D.; Stamm, R.; Steinhäusen, M.*: Neue Herausforderungen an die Ermittlung, Dokumentation und Auswertung von Expositionsdaten zu Gefahrstoffen. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 72 (2012) Nr. 1/2, S. 12-20
- [71] Expositionsdatenbank MEGA. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. www.dguv.de/ifa Webcode: d4806 (verfügbar am: 29.4.2020)
- [72] DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung (9/2003). Beuth, Berlin 2003
- [73] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). *Ausg.* 3/2019. *GMBL.* (2019) Nr. 7, S. 117-119
- [74] *Mattenklott, M.*: Die Dichte von A-Stäuben (Kennzahl 0412-3). *Lfg.* 1/2015. In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V., Berlin. Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappdigital.de/IFA-AM_0412-3-3 (verfügbar am: 3.6.2019)
- [75] DIN EN 13205-1: Exposition am Arbeitsplatz – Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sammlern für die Messung der Konzentration luftgetragener Partikel – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (9/2014). Berlin, Beuth 2014
- [76] DIN EN 482: Exposition am Arbeitsplatz – Allgemeine Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verfahren zur Messung chemischer Arbeitsstoffe (12/2015). Berlin, Beuth 2015
- [77] *Möhlmann, C.*: Staubmesstechnik – damals bis heute. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 65 (2005) Nr. 5, S. 191-194
- [78] *Sachs, L.*: *Angewandte Statistik.* Heidelberg, Springer 1999
- [79] *Fahrmeir, L.; Heumann, C.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.*: *Statistik – Der Weg zur Datenanalyse.* 8. Aufl. Wiesbaden, Springer Spektrum 2016
- [80] *Janssen, J.; Laatz, W.*: *Statistische Datenanalyse mit SPSS – Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests.* Wiesbaden, Springer Gabler 2017
- [81] *Bochmann, F.; Morfeld, P.*: Die Verteilung der Messwerte von Staubmessungen und ihre Bedeutung für die Grenzwertableitung. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 71 (2011) Nr. 10, S. 419-423
- [82] *Greim, H.*: Ableitung von schichtbezogenen MAK-Werten für Stäube aus Langzeitgrenzwerten. *Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten.* MAK 23 (1996), S. 1-22
- [83] *Razali, N. M.; Wah, Y. B.*: Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *J. Stat. Model. Analytics* 2 (2011) Nr. 1, S. 21-33
- [84] *Levene, H.*: On the power function of tests of randomness based on runs up and down. *Ann. Math. Statist.* 23.1 (1952) Nr. 1, S. 34-56
- [85] *Burstyn, I.; Teschke, K.; Kennedy, S. M.*: Exposure levels and determinants of inhalable dust exposure in bakeries. *Ann. Occup. Hyg.* 41 (1997) Nr. 6, S. 609-624
- [86] *Poole, M. A.; O'Farrell, P. N.*: The assumptions of the linear regression model. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 52 (1971), S. 145-158
- [87] *Wollschläger, D.*: *Grundlagen der Datenanalyse mit R – Eine anwendungsorientierte Einführung.* 3. Aufl. Wiesbaden, Springer Spektrum 2014
- [88] *Preisser, J. S.; Qaqish, B. F.*: Deletion diagnostics for generalized estimating equations. *Biometrika* 83 (1996) Nr. 3, S. 551-562
- [89] *Kleinbaum, D. G.; Kupper, L. L.; Muller, K. E.*: *Applied regression analysis – And other multivariable methods.* 2. Aufl. Boston, PWS Publishing 1988
- [90] *Draper, N. R.; Smith, H.*: *Applied regression analysis.* Bd. 326. John Wiley & Sons 2014
- [91] *Ring, C.; Ryll, A.; Gaus, W.*: Das Bestimmtheitsmaß R² bei linearen Regressionsmodellen mit und ohne Intercept – die Tücken der Statistikprogramme. *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 35 (2006) Nr. 11, S. 607-612
- [92] *Bortz, J.; Lienert, G. A.*: *Kurzgefasste Statistik für die Klinische Forschung.* 3. Aufl. Heidelberg, Springer 2008
- [93] *Schmidt, E.*: *Kurz gefasste Grundlagen der Partikelcharakterisierung und der Partikelabscheidung.* Düren, Shaker 2001
- [94] *Draxler, J.; Siebenhofer, M.*: *Verfahrenstechnik in Beispielen.* Berlin, Springer 2014, S. 239-258

- [95] DIN 66144: Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen – Logarithmisches Normalverteilungsnetz. (3/1974) Berlin, Beuth 1974
- [96] ISO 9276-5: Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalyse – Teil 5: logarithmisches Normalverteilungsnetz (8/2005). Berlin, Beuth 2005
- [97] *Lantz, B.*: The large sample size fallacy. *Scand. J. Caring Sci.* 27 (2013) Nr. 2, S. 487-492
- [98] *Vaarslahti, K.; Keskinen, J.; Gieschaskiel, 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
- [99] *Dasch, J.; D’Arcy, J.; Gundrum, A.; Sutherland, J.; Johnson, J.; Carlson, D.*: Characterization of fine particles from machining in automotive plants. *J. Occup. Environ. Hygiene* 2 (2005) Nr. 12, S. 609-625
- [100] *Barbosa-Cánovas, G. V.; Ortega-Rivas, E.; Juliano, P.; Yan, H.*: Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York 2005
- [101] *Goudeli, S.; 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
- [102] *Rumpf, H.; Sommer, K.; Steier, K.*: Mechanismen der Haftkraftverstärkung bei der Partikelhaftung durch plastisches Verformen, Sintern und viskoelastisches Fließen. *Chemie Ingenieur Technik* 48 (1976) Nr. 4, S. 300-307
- [103] *Baccaredda, M.; Christiansen, J. A.; Cremer, E.; Geib, K. H.; Hedvall, J. A.; Hüttig, G. F.*: Heterogene Katalyse III. Vol. 6. Springer, Berlin 2013
- [104] *Atkins, P. W.; de Paula, J.*: Kurzlehrbuch Physikalische Chemie. 4. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim 2008
- [105] *Koch, W.; Dunkhorst, W.; Lodding, H.*: Design and performance of a new personal aerosol monitor. *Aerosol Sci. Technol.* 31 (1999) Nr. 2-3, S. 231-246
- [106] *Adamsson, E.*: Long-term sampling of airborne cadmium dust in an alkaline battery factory. *Scand. J. Work Environ. Health* 5 (1979) Nr. 3, S. 178 – 187.
- [107] *Weißbach, W.*: Werkstoffkunde. 16. Aufl. Viewegs Fachbücher der Technik, Wiesbaden 2007
- [108] *Klocke, F.*: Fertigungsverfahren 1: Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide. 9. Aufl. Springer VDI, Düsseldorf 2018
- [109] *N. T. Jenkins, N. T.; Pierce, W. M.-G.; Eaga, T. W.*: Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes. *Welding J.* 84 (2005), S. 156-163
- [110] *Dasch, J.; D’Arcy, J.*: Physical and chemical characterization of airborne particles from welding operations in automotive plants. *J. Occup. Environ. Hyg.* 5 (2008) Nr. 7, S. 444-454
- [111] *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
- [112] *Bilgin, N.; Yeprem, H. A.; Arslan, S.; Bilgin, A.; Günay, E.; Marsoglu, M.*: Use of waste marble powder in brick industry. *Constr. Build. Mater.* 29 (2012), S. 449-457
- [113] *Ennan, A. A.; Kiro, S. A.; Oprya, M. V.; Vishnyakov, V. I.*: Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding. *J. Aerosol Sci.* 64 (2013), S. 103-11

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Glinkastraße 40
10117 Berlin

Telefon: 030 288763800

Fax: 030 288763808

E-Mail: info@dguv.de

Internet: www.dguv.de

