

# Die übersehene Zutat

Wie ein unscheinbares Metalloxid eine weltweite Zäsur in Arbeits- und Umweltschutz auslöst

von Markus Sommer

Długosza, Oktober 2026

Version 1.2 · Oktober 2026

## Zum Autor

Ich komme aus einer Isoliererfamilie. Bei uns stand der Beruf mit der Geburt fest. Weil ich als Handwerker nicht besonders brauchbar war, setzte man mich ins Büro, und dort wurde ich für die Dokumente zuständig. In den Neunzigerjahren schrieb ich unsere Datenblätter noch mit der Schreibmaschine. Wir wollten die Zusammensetzungen vollständig nennen, also tippte ich die Bestandteile von Glasgeweben, Mineral- und Basaltwollen wieder und wieder ab: Siliciumdioxid, Aluminiumoxid, Calciumoxid.

Mein Vater machte sich 1988 als Hersteller textiler Isolierungen selbständig. Drei Jahre später starb er mit 59 Jahren an Asbestose. Er hatte nie unmittelbar mit Asbest gearbeitet, aber in Räumen, in denen früher Asbestisoliermatten gefertigt worden waren. Diese Räume hatte niemand saniert.

Am 9. August 2019 saß ich in einem Café in Österreich. Am Vortag hatten wir in der Nähe bei einem Motorenhersteller einen Prototypen mit einer neuen Wärmedämmung versehen. Um 10:00 Uhr bekam ich von diesem eine Mail mit dem Titel „Chromium-6 alert“. An im Betrieb befindlichen Motoren waren Ablagerungen gefunden worden, die positiv auf Chrom(VI) getestet worden waren.

Den Begriff Chrom(VI) kannte ich bis dahin nur aus dem Film „Erin Brockovich“.

Einen Satz überlas ich an diesem Tag. Ob unsere Produkte Calcium enthalten, wurden wir gefragt, denn Calcium würde die Bildung von Chrom(VI) begünstigen.

Calcium. Ein Bestandteil, dessen Namen ich jahrelang oft mit der Schreibmaschine in unsere Datenblätter geschrieben habe. Chemie war nie mein Lieblingsfach, aber Chrom(VI) und Calcium passten für mich chemisch einfach nicht zusammen. Meine Neugier war erweckt und ich begann zu suchen. Und ich fand den Zusammenhang zwischen Chrom(VI) und Calcium, der übersehenen Zutat.

Markus Sommer

## Einleitung

Hochtemperaturdämmstoffe enthalten basische Oxide, vor allem Calcium- und Natriumoxid. Beide sind nicht als krebserzeugend eingestuft und tauchen in keiner Chrom(VI)-Betrachtung auf. Oberhalb von etwa 300 °C reagieren sie mit der Chromoxidschicht chromlegierter Heißeile zu Calcium- und Natriumchromat. Das Ergebnis sind krebserzeugende Verbindungen, die niemand hergestellt, bestellt oder verbaut hat.

In der Abfallverbrennung stammen die basischen Oxide aus dem Brenngut selbst. Hinzu kommen die Sorbentien der sauren Rauchgasreinigung, Kalkhydrat oder Natriumbicarbonat, die allerdings erst im Rauchgasweg nach dem Kessel eingedüst werden und deshalb den Filterstaub und die nachgeschalteten Anlagenteile betreffen.

Als Teil der Aschen treffen die Oxide aus dem Brenngut auf die chromhaltigen Oberflächen von Rostelementen und Kesselzügen, und es entstehen Chromate. Bei der nächsten Revision werden diese Aschen aufgewirbelt und freigesetzt, bislang häufig ohne Schutzkonzept.

Die Verwendung des Sammelbegriffs „Chrom(VI)“ anstatt der korrekten Nennung der Chrom(VI)-Verbindungen (Chromate) hat dazu geführt, dass über Jahrzehnte nicht gefragt wurde, welche Verbindung tatsächlich vorliegt und welcher Reaktionspartner sie erzeugt hat. Entstanden ist ein Bestand an Anlagen, Fahrzeugen, Bauteilen und Rückständen, der die betroffenen Branchen über Jahrzehnte beschäftigen wird: Energieerzeugung, Abfallverbrennung, Schifffahrt, Fahrzeugbau, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung.

Für den Arbeits- und Umweltschutz macht es keinen Unterschied, ob Chrom(VI) gezielt verwendet wird, in situ entstanden ist oder jederzeit entstehen kann. Wird es gefunden oder lässt sich seine Präsenz nicht ausschließen, ist zu reagieren. Die Gefährdungsbeurteilung fällt in allen drei Fällen gleich aus.

Wo die Entstehung verhindert werden kann, muss sie verhindert werden. In der Hochtemperaturdämmung gibt es Substitute, die den Bildungsweg ausschließen. In der Abfallverbrennung lässt sich die Entstehung nicht verhindern. Dort bleibt anzuerkennen, dass sie stattfindet, und Arbeits- und Umweltschutz entsprechend neu zu bestimmen.

Grundlage sind nicht allein Patente, Studien und Herstellerunterlagen, sondern auch eigene, seit 2019 dokumentierte Begehungen, Wisch- und Materialproben an Motoren, Kraftwerken, Verbrennungsanlagen, Schiffen, Fahrzeugen und Baumaschinen. Diese Expertise benennt Chrom(VI) mit seinen Verbindungen, die sich daraus ergebenden Reaktionspartner und den Weg, wie sie sich verbinden. Genau diese Entstehung kann in den meisten Fällen verhindert werden. Und wenn wir die Verbindungen kennen, können wir sie beherrschen (Müllverbrennung), entfernen (Dämmtechnik und Sanierung) oder ihre Entstehung von vornherein verhindern (Substitution). Die Frage, ob man es nicht hätte sehen müssen, stellt sich; manchmal ist der Blick aber auch verstellt. Das Asbestgeschehen sollte uns ein mahnendes Beispiel sein. Geschichte darf sich nicht wiederholen, aber sie tut es bereits.

## Zusammenfassung der wesentlichen Befunde und ihrer Konsequenzen

Diese Fachanalyse richtet sich an Unternehmen, die chromlegierte Heißeile dämmen, betreiben, warten oder entsorgen, Fahrzeuge instand halten oder Verbrennungsrückstände handhaben. Sie stellt dar, wie Calcium- und Natriumchromat in diesen Bereichen in situ entstehen, welche Belege dafür vorliegen und welche Pflichten sich daraus ergeben.

### Der zentrale Befund

Eine Dämmung, die im Lieferzustand kein Chrom(VI) enthält, kann durch ihre eigene Zusammensetzung zur Bildung von Chromaten im Betrieb beitragen. Die Angabe, dass ein Dämmstoff im Lieferzustand kein Chrom(VI) enthält, beantwortet nicht die Frage, ob er in seiner vorgesehenen Anwendung zur Chromatbildung beiträgt.

### Entstehung und Reichweite

Die Bildung setzt vier Bedingungen voraus: eine Chromquelle, in der Regel die Oxidschicht chromlegierten Stahls, ein basisches Oxid als Reaktionspartner, Sauerstoff und erhöhte Temperatur. Natriumchromat entsteht ab etwa 200 °C, Calciumchromat ab etwa 300 bis 350 °C. Der Reaktionspartner stammt aus Calciumsilikat, Mineral- und Steinwolle, E-Glasgewebe, AES-Wollen, Feuerfestmassen, Montagepasten oder Verbrennungsrückständen.

Damit ist das Thema nicht an ein Produkt und nicht an einen Hersteller gebunden. Basische Oxide sind konstitutiver Bestandteil der Glasschmelze, aus der die meisten Hochtemperaturfasern gezogen werden, und sie gelangen über Altglas, Kalkstein und Dolomit zwangsläufig in die Rezeptur (Abschnitt 13).

### Beleglage

Der Bildungsweg ist seit 1939 patentiert beschrieben und seither mehrfach experimentell bestätigt, zuletzt mit dem direkten Nachweis von Calcium- und Natriumchromat an der Grenzfläche zwischen Metall und Dämmstoff (Abschnitt 10). Hersteller und Betreiber haben ihn seit 1990 in eigenen Mitteilungen beschrieben, beginnend mit dem Plant Service Bulletin von Babcock & Wilcox und fortgesetzt in Service-Mitteilungen und Technischen Anweisungen der Jahre 2020 bis 2025 (Abschnitt 16). Hinzu kommen eigene Begehungen, Wisch- und Materialproben seit 2019 an Motoren, Kraftwerken, Verbrennungsanlagen, Schiffen, Fahrzeugen und Baumaschinen (Abschnitt 27). Diese drei Stränge sind unabhängig voneinander und stützen denselben Befund.

### Handlungsbedarf

Die deutsche TRGS 561 verlangt das Schutzregime bereits dann, wenn eine Belastung nicht auszuschließen ist. Für die Gefährdungsbeurteilung ist unerheblich, ob das Chromat gezielt verwendet wurde oder in situ entstanden ist. Vorrangig ist die Substitution: Hochtemperaturdämmstoffe ohne reaktionsverfügbare Alkali- und Erdalkalioxide stehen zur Verfügung. Wo die Entstehung nicht vermeidbar ist, etwa in der Abfallverbrennung, bleibt die Anerkennung des Vorgangs und die darauf abgestimmte Organisation von Arbeits- und Umweltschutz.

### Praktische Folgen

Bei Demontage, Wartung, Reinigung, Revision, Rückbau und Wiederverwendung können die im Betrieb entstandenen Chromate freigesetzt werden und Menschen exponieren. Der Staub trägt das Chromat, und er verlässt mit Werkzeug, Kleidung und Bauteilen den Arbeitsbereich.

Reinigung und Dekontamination wirken für den jeweiligen Arbeitsvorgang. Sie beseitigen die materialbedingte Ursache nicht: Bleibt die calciumhaltige Dämmung am chromlegierten Heißeil, entstehen bei der nächsten thermischen Beanspruchung erneut Chromate (Abschnitt 26).

Eine analytische Entwarnung ist nur so belastbar wie die Wiederfindung des Verfahrens an dieser Matrix. Für thermische Dämmstoffe existiert keine genormte Methode; übertragene Verfahren liefern Unterbefunde bis nahe null. Ein Nullbefund ohne Angabe der Wiederfindung ist kein Nachweis der Abwesenheit (Abschnitt 17).

### Was belegt ist und was offen bleibt

Belegt sind der Bildungsweg, die beteiligten Verbindungen, die Temperaturbereiche und der Wissensstand bei Herstellern und Betreibern. Aus der Gesamtschau folgt, dass der Vorgang kein Einzelfall ist, sondern an jeder Kombination aus chromlegiertem Heißeil und basischem Dämmstoff auftreten kann. Unbekannt ist die Größenordnung des betroffenen Anlagenbestands, weil er nie unter dieser Fragestellung erfasst wurde.

Offen sind die quantitativen Randbedingungen: die genauen Temperaturschwellen im Einzelfall, der Einfluss des Chromgehalts der Legierung, der erforderliche Gehalt an Calcium- oder Natriumoxid, Kinetik, Feuchte und Zyklenzahl. Diese Fragen lassen sich seriös nicht pauschal beantworten, und daran wird sich auf absehbare Zeit wenig ändern. Sie betreffen die Ausprägung der Reaktion, nicht ihr Bestehen.

In Stellungnahmen von Dämmstoffherstellern und Behörden wird der nicht abschließend geklärte Bildungsmechanismus gelegentlich angeführt, um weitergehende Konsequenzen zurückzustellen. Diese Unterscheidung hält der Beleglage nicht stand.

Dass Calcium- und Natriumchromat an der Grenzfläche zwischen chromlegiertem Metall und basischem Dämmstoff entstehen, ist patentiert beschrieben, experimentell nachgewiesen, von Herstellern in eigenen Mitteilungen bestätigt und im Feld wiederholt gefunden worden. Zur Disposition steht die Genauigkeit der Randbedingungen, nicht der Vorgang selbst.

Hinzu kommt eine strukturelle Besonderheit. Behörden, Unfallversicherungsträger, Hersteller- und Schadstoffverbände arbeiten seit Jahrzehnten eng mit den Herstellern der Asbestsubstitute zusammen, und diese Zusammenarbeit hat ein umfangreiches und funktionierendes Regelwerk für Asbestsanierung und den sachgerechten Einsatz der Ersatzstoffe hervorgebracht.

Dass dieselben Werkstoffklassen außerhalb der Gebäudedämmung, nämlich in der industriellen Hochtemperaturdämmung, nun wegen ihrer Bestandteile selbst in den Blick der Chromatbildung geraten, ist eine unbequeme Entwicklung. Sie ändert nichts an der Beleglage.

Gebäude- und Haustechnik einerseits und Hochtemperaturdämmung andererseits sind in Anwendung, Betriebstemperatur und Folgen zu trennen. Diese Trennung folgt aus dem Arbeits- und Umweltschutzrecht, denn beurteilt wird die Tätigkeit unter ihren tatsächlichen Bedingungen und nicht die Werkstoffklasse im Allgemeinen.

Ein Dämmstoff, der im Gebäude unbedenklich ist, kann auf einem chromlegierten Heißeil ein Chromatproblem erzeugen.

Diese Unterscheidung ist anzuerkennen, auch wenn sie für die betroffenen Hersteller und die aufsichtsführenden Stellen unbequem ist. Dass sie erst jetzt getroffen wird, ist angesichts der Materialgeschichte nachvollziehbar.

Möglich gewesen, das zeigt diese Fachanalyse deutlich, wäre sie früher.

Chemie lügt nicht.

---

## Inhalt

---

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>A. Das übersehene Thema</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| 1. Das Wissen ist seit Jahrzehnten dokumentiert                                                | 9         |
| 2. Das Thema ist in Europa angekommen                                                          | 10        |
| 3. Das Chrom(VI)-Missverständnis: Sammelbegriff und Einzelverbindung                           | 11        |
| 4. Anwendungsfelder und zu erwartende Chromate                                                 | 14        |
| 5. Warum das Thema nicht erkannt wird                                                          | 16        |
| 6. Warum es zum Thema wird                                                                     | 17        |
| <b>B. Grundlagen</b>                                                                           | <b>19</b> |
| 7. Das Patent von 1938/1939: Calciumchromat als bewusst erzeugtes Reaktionsprodukt             | 19        |
| 8. Natrium: Beschleuniger, Steuerstoff und Chromatbildner                                      | 19        |
| 9. Der chemische Kern des Bildungswegs                                                         | 19        |
| 10. Direkter experimenteller Nachweis: von der Modellmischung zur Metall-Dämmstoff-Grenzfläche | 20        |
| <b>C. Isoliertechnik: Heißeile und Dämmung</b>                                                 | <b>23</b> |
| 11. Von der metallurgischen Röstung zur Hochtemperaturdämmung                                  | 23        |
| 12. Bedeutung für E-Glasgewebe, Calciumsilikat, Mineralwolle und Aerogel-Dämmsysteme           | 24        |
| 13. Das Dilemma der Dämmstoffhersteller                                                        | 25        |
| 14. Gasphasentransport: Tatar/Gannon und van Leeuwen                                           | 26        |
| 15. Asbestzeit, Asbestsubstitution und Chrysotil                                               | 28        |
| 16. Hersteller- und Betreiberwarnungen: dokumentierter industrieller Wissensstand              | 31        |
| 17. Analytik: Die Methode entscheidet über den Befund                                          | 35        |
| 18. Regelwerke im Vergleich: ein Maßstab, fünf Ausprägungen                                    | 36        |
| 19. Schnelltest-Philosophie und die französische Feldstudie                                    | 37        |
| <b>D. Fahrzeuge</b>                                                                            | <b>40</b> |
| 20. Fahrzeugmotoren und Motorräume                                                             | 40        |
| <b>E. Verbrennungsrückstände: Aschen, Kesselablagerungen, Feuerbestattung</b>                  | <b>43</b> |
| 21. Verbrennungsaschen und Kesselablagerungen                                                  | 43        |
| 22. Wissensstand in Europa zu Verbrennungsrückständen                                          | 44        |
| 23. Feuerbestattungen und weitere chromhaltige Verbrennungsgüter                               | 45        |
| <b>F. Gesundheit, Regulierung, offene Fragen und Schlussfolgerung</b>                          | <b>46</b> |
| 24. Gesundheitliche und ökologische Konsequenzen der Chromate                                  | 46        |
| 25. Industriell hergestellt oder in situ gebildet: ungleiche Kontrolle                         | 48        |
| 26. Vermeintliche Abhilfen: Neutralisierung, WD-40 und das „harmlose“ Chrom(III)               | 51        |
| 27. Eigene Feldbefunde                                                                         | 52        |
| 28. Was noch untersucht werden kann und was nicht mehr offen ist                               | 52        |
| 29. Rechtsfolgen bei Nichteinhaltung                                                           | 53        |
| 30. Schlussfolgerung                                                                           | 56        |
| Quellen                                                                                        | 59        |

## A. Das übersehene Thema

### 1. Das Wissen ist seit Jahrzehnten dokumentiert

Der Bildungsweg von Calcium- und Natriumchromat ist nicht neu. Er ist in Patentschriften, Forschungsarbeiten, Herstellerunterlagen und Regelwerken über mehr als acht Jahrzehnte dokumentiert. Die folgende Übersicht nennt die in dieser Expertise ausgewerteten Stationen; die Belege stehen in den angegebenen Abschnitten.

| Jahr      | Quelle                                                        | Dokumentierter Inhalt                                                                                                                                                                                                          |
|-----------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1939      | US-Patent US 2,176,687 (Udy) [1]                              | Gezielte Bildung von Calcium- und Natriumchromat aus einer Chromquelle, Kalk beziehungsweise Soda und Sauerstoff (Abschnitt 7).                                                                                                |
| 2002      | Paoletti, deutsches Forschungszentrum Karlsruhe [50]          | Calciumchromat aus Chromoxid und Calciumoxid zwischen 500 und 850 °C in der Abfallverbrennung, abhängig vom Sauerstoffangebot (Abschnitt 21).                                                                                  |
| 2004      | Vehlow, Paoletti, Seifert, Sirini [51]                        | Vorstellung der Ergebnisse einschließlich Thermogravimetrie zu Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> und CaO mit dem Produkt CaCrO <sub>4</sub> (Abschnitt 21).                                                                       |
| 2010/2011 | Toshiba, JP2011232021A [26]                                   | Calciumchromat an der Grenzfläche zwischen Edelstahl und calciumhaltiger Wärmedämmung; keramische Trennschicht als Präventionsansatz (Abschnitt 11).                                                                           |
| 2015      | Sayano et al. [11]                                            | CaCrO <sub>4</sub> und Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> an der Grenzfläche zwischen chromhaltigem Metall und Wärmedämmstoff experimentell identifiziert (Abschnitt 10).                                                        |
| 2019      | Herstellerkorrespondenz [52]                                  | Calcium aus dem Isoliermaterial in Reaktion mit chromhaltigem Edelstahl als Ursache benannt; Auftreten bei allen Motortypen (Abschnitt 16).                                                                                    |
| 2019      | Energy UK, Hexavalent Chromium Safety Bulletin Summary [92]   | Calciumhaltiges Produkt, Temperaturen über 300 °C und chromhaltiger Stahl als die drei Bedingungen; Annahme der Anwesenheit an allen Kraftwerksstandorten; zugleich Hinweis auf WD-40 zum Binden und Abwischen (Abschnitt 26). |
| 2019      | Deutsches Umweltbundesamt (UBA) [44]                          | Cr(VI) in allen 25 untersuchten Modellaschen aus Kremationsöfen (Abschnitt 23).                                                                                                                                                |
| 2019      | Europäisches BVT-Merkblatt Abfallverbrennung [34]             | Sechswertiges Chrom als problematischer Stoff hinsichtlich der Auslaugung aus Bodenasche (Abschnitt 22).                                                                                                                       |
| 2020/2021 | Caterpillar; Caterpillar Energy Solutions / Zeppelin [12, 13] | Cr(VI)-Befunde an Abgassystemen und Abgasisolierungen; französische Übersetzung des Bulletins und deutschsprachiges Rundschreiben (Abschnitt 16).                                                                              |
| 2023      | Rockwool, europäische ProRox-Anweisung [16, 24]               | Cr(VI)-Ablagerungen nach Hochtemperatureinsatz, Krebsgefahr und Schutzmaßnahmen beim Ausbau (Abschnitt 16).                                                                                                                    |

| Jahr | Quelle                                             | Dokumentierter Inhalt                                                                                                                                                      |
|------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2023 | [25]                                               | Chromhaltiger Stahl, Calcium etwa aus Dämmmaterial, Sauerstoff und Temperaturen über 400 °C (Abschnitt 16).                                                                |
| 2023 | MAN Truck & Bus SE, Service-Mitteilung 8339SM [14] | Calciumchromat benannt; für Montagearbeiten ausschließlich calciumfreie Pasten (Abschnitt 16).                                                                             |
| 2025 | Frenzelit, TechInfo 28 [15]                        | Calciumoxidanteile eigener Isolationsmaterialien; Beitrag eigener Produkte zur Cr(VI)-Bildung unter den genannten Bedingungen (Abschnitt 16).                              |
| 2025 | [22, 23]                                           | Cr(VI)-Bildung auf heißen Abgaskomponenten; bestätigte Kontaminationen im Motorraum (Abschnitt 20).                                                                        |
| 2025 | Passeron et al., Frankreich [5]                    | Kolorimetrische Schnelltests übersehen laboranalytisch nachgewiesenes Cr(VI) (Abschnitt 19).                                                                               |
| 2026 | Deutsche TRGS 561, Fassung 4. Mai 2026 [19]        | Alkali-/Erdalkalimetalloxide aus Dämmstoffen oder Montagepasten als Einflussfaktor; Schutzmaßnahmen, wenn eine Chrom(VI)-Belastung nicht auszuschließen ist (Abschnitt 6). |
| 2026 | Deutsche Berufsgenossenschaft BG ETEM [2]          | Bildung krebserzeugender Chromate bei Stahltemperaturen von etwa 350 bis 800 °C durch alkali- und erdalkalimetallhaltige Dämmstoffe oder Montagepasten (Abschnitt 11).     |

Wer heute chromlegierte Heißeile mit basischen Dämmstoffen kombiniert, wartet oder entsorgt, stützt sich damit nicht auf eine offene Forschungsfrage, sondern auf einen über Jahrzehnte beschriebenen und mehrfach bestätigten Reaktionsweg.

## 2. Das Thema ist in Europa angekommen

Die Hersteller- und Betreiberunterlagen der Übersicht stammen überwiegend aus Europa: von deutschen Herstellern (MAN, Frenzelit, [REDACTED]), einem österreichischen Motorenhersteller ([REDACTED]), einem britischen Fahrzeughersteller ([REDACTED]), aus der europäischen Rockwool-Anweisung, dem deutschsprachigen Rundschreiben von Caterpillar Energy Solutions und Zeppelin sowie der französischen Übersetzung des Caterpillar-Bulletins. [12-16, 22, 23, 25]

Hinzu kommen Behörden, Regelwerke und Forschung in Europa: die deutsche Berufsgenossenschaft BG ETEM, die deutsche TRGS 561, das deutsche Umweltbundesamt (UBA), das europäische BVT-Merkblatt Abfallverbrennung, der britische Praxisfall aus der Abfallverbrennung und die französische Feldstudie bei der Wartung von Diesel- und Schiffsmotoren. Der europäische Verband der Hochtemperatur-Dämmwollhersteller ECFIA gab Forschung zur Cr(VI)-Bildung an Dämmwollen in Auftrag (Abschnitt 14). [2, 5, 19, 30, 34, 37, 44]

Das Thema ist damit weder ausländisch noch theoretisch. Es steht in den Service-Mitteilungen, Technischen Anweisungen, Produktinformationen und Regelwerken, die in europäischen Betrieben, Werkstätten und Anlagen gelten. Ob es dort als eigenes Thema erkannt wird, ist eine andere Frage.

### 3. Das Chrom(VI)-Missverständnis: Sammelbegriff und Einzelverbindung

#### Auch Asbest war nicht einfach Asbest

Auch Asbest war nicht einfach Asbest. Umgangssprachlich wurde allenfalls nach Farben unterschieden, in Weiß-, Braun- und Blauasbest. Dahinter stehen verschiedene Minerale: Chrysotil, Amosit und Krokydolith, dazu Tremolit, Aktinolith und Anthophyllit. Die europäische Asbestrichtlinie 2009/148/EG führt diese sechs Faserminerale einzeln auf. [62] Unterschieden wurde allerdings nur dort, wo es gebraucht wurde: in der Wissenschaft, in der Technik und später in der Medizin, als Faserform, Beständigkeit und Krankheitsbild auseinanderzuhalten waren. Auf der Baustelle und im allgemeinen Sprachgebrauch blieb es bei einem Wort. Das hatte wenig Folgen, weil jedes dieser Minerale eine Faser war und die Faser die Gefahr darstellte.

Mit „Chrom(VI)“ verhält es sich ähnlich, nur fehlt hier selbst die umgangssprachliche Unterscheidung. Der Begriff fasst industriell hergestellte Verbindungen wie Chromsäure, Dichromate und chromathaltige Farben und Grundierungen ebenso zusammen wie Calcium- und Natriumchromat, die im Betrieb entstehen. Wer „Chrom(VI)“ hört, denkt an Stoffe, die er selbst nicht einsetzt, und schließt daraus, dass ihn das Thema nicht betrifft. Calcium- und Natriumchromat als Reaktionsprodukte des eigenen Betriebs kommen in diesem Bild nicht vor. Dass Calciumchromat im Tierversuch zu den wirksamsten Chromaten gehört, verschwindet ebenfalls hinter dem Sammelbegriff (Abschnitte 24 und 25).

#### Die Vorsilbe benennt den Reaktionspartner

In nahezu jedem festen Befund steht hinter der Bezeichnung „Chrom(VI)“ ein Salz, ein Chromat oder Dichromat, und die Vorsilbe dieses Salzes nennt seinen Reaktionspartner: Bleichromat, Zinkchromat, Strontiumchromat, Natriumchromat, Calciumchromat. Die Vorsilbe ist keine Formalie. Sie ist die andere Hälfte des Stoffes und sagt, woher er kommt. Chromtrioxid und Chromsäure sind keine Salze und haben keinen solchen Partner. Sie sind deshalb nicht weniger krebserzeugend, gehören aber zur galvanischen und Oberflächentechnik, wo die Verwendung gewollt und deklariert ist.

#### Die Reaktionspartner sind unauffällig

Die Partner, die in der gezielten Verwendung vorkommen, sind selbst als gefährlich bekannt: Blei, Zink, Strontium. Die Partner, die in situ zum Chromat führen, sind es nicht. Calcium ist als Element der Baustoff von Knochen und Bestandteil von Milch, Natrium ist Kochsalz, beide sind in der Drogerie erhältlich. Der Reaktionspartner im Dämmstoff ist allerdings nicht das Element, sondern das Oxid. Chrom(III) wurde jahrzehntelang als essentielles Spurenelement der Nahrung geführt; die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit kam 2014 zu dem Ergebnis, dass ein Nachweis der Essentialität fehlt, und legte keine Referenzwerte fest, während in den Vereinigten Staaten weiterhin ein Zufuhrwert besteht und Chrom als Nahrungsergänzungsmittel verkauft wird. Keiner dieser drei Stoffe gibt Anlass, ein Produkt auf ihn zu prüfen. [76]

Unauffällig heißt dabei nicht unbedenklich. Calciumoxid ist als hautreizend, schwer augenschädigend und atemwegsreizend eingestuft (H315, H318, H335), und die Richtlinie (EU) 2017/164 nennt einen Richtgrenzwert von 1 mg/m³ als alveolengängige Fraktion. Natriumoxid bildet mit Wasser Natronlauge und wirkt entsprechend ätzend. Beide sind aber nicht krebserzeugend und nicht CMR-ingestuft, und im Dämmstoff liegen sie in der Silikatmatrix gebunden vor. Unauffällig sind sie deshalb nicht in jeder Hinsicht, sondern genau in der einen, auf die es hier ankommt: Wer nach einem Krebsrisiko sucht, hat keinen Anlass, auf sie zu schauen. [79]

### Die Schublade „Beschichtung“

Weil Chrom(VI) gedanklich mit Farben und Grundierungen verbunden ist, wird ein Chrom(VI)-Fund auf eine Beschichtung zurückgeführt, und wenn keine Beschichtung vorhanden ist, auf die Legierung. Beide Antworten verlegen die Quelle in einen bereits geregelten Zuständigkeitsbereich. Dabei tragen gerade die bekannten Pigmente ihren Partner im Namen, und niemand wundert sich darüber. Der Schritt, der ausbleibt, ist die Frage, was gilt, wenn dieser Partner Calcium oder Natrium heißt und niemand ihn absichtlich dorthin gebracht hat.

### Der Reaktionspartner steht im Datenblatt und ist dennoch nicht lesbar

Das Sicherheitsdatenblatt eines Hochtemperatur-Dämmprodukts von Morgan Advanced Materials, Ceraform 130, Erstausgabe 1. September 1990, Fassung vom 23. Dezember 2020, führt unter Abschnitt 3 Chrom(III)-oxid mit bis zu 3 Prozent und als Hauptbestandteil „Refractories, Fibers, Aluminosilicate“ mit der CAS-Nummer 142844-00-6 zu 45 bis 80 Prozent auf. Der Einsatzbereich ist mit bis zu 1400 °C angegeben. Welche Oxide hinter dieser CAS-Nummer stehen, sagt das Datenblatt nicht. Das Registrierungsdossier der ECHA zu derselben Nummer bezeichnet den Stoff als amorphe Glasfaser aus Siliciumdioxid und Aluminiumoxid „and a range of oxides such as zirconia, ferric oxide, titanium oxide, magnesiumoxide, calcium oxide, other alkaline earth oxides including sodium oxide, potassium oxide, barium oxides“. Beide Reaktanden liegen damit in einem einzigen Produkt deklariert vor. Abschnitt 10 desselben Datenblatts bezeichnet das Material als stabil, nennt unter unverträglichen Stoffen „None“ und führt als gefährliche Zersetzungsprodukte nur Kohlenoxide und Ammoniakspuren aus der Stärke auf. [77, 78]

Hinzu kommt, dass Calciumchromat in der gezielten Verwendung kaum eine Rolle spielt und deshalb selten benannt wird. Rechtlich ist es gleichwohl erfasst: Die REACH-Zulassungsliste führt es zwar nicht namentlich, der Beschränkungsvorschlag der ECHA umfasst jedoch die Salze der Chromsäure und damit auch Calciumchromat. Die Beschränkung trifft also einen Stoff, den kaum jemand in seine Betrachtung einbezieht, weil er in der chemischen Zusammensetzung des ausgelieferten Produkts nicht vorkommt. Er entsteht aber trotzdem thermochemisch im eigenen Betrieb, auf der Anlage oder gar durch den Einsatz des eigenen Produkts. [59, 64]

### Analytik: Chrom(VI)-Gehalt statt Verbindung

Ist das Chromat entstanden und wird es nur als „Chrom(VI)“ bezeichnet, erschwert das die Ursachenanalyse. Die übliche Laboranalytik bestimmt den Chrom(VI)-Gehalt, nicht die Verbindung. Auch Verfahren der Elementanalytik, etwa mit induktiv gekoppeltem Plasma, bestimmen Elemente und, gekoppelt mit Ionenchromatographie, den Chrom(VI)-Gehalt. Die Verbindung selbst erfassen sie nicht, weil die Probe dafür gelöst wird.

Welche Chromatphase vorliegt, klärt erst eine Phasenanalytik wie die Röntgenbeugung (XRD), mit der Sayano et al.  $\text{CaCrO}_4$  und  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  identifiziert haben. Sie gehört nicht zur Routineanalytik und erfasst nur einen kleinen Ausschnitt der Probe und nur kristalline Phasen oberhalb ihrer Nachweisgrenze. Eine Aussage über die gesamte Oberfläche eines Bauteils oder einer Dämmung liefert sie nicht. [11]

Für den Arbeitsschutz folgt daraus keine Unsicherheit, sondern eine klare Vorgabe: Lässt sich eine krebserzeugende Chrom(VI)-Verbindung nicht seriös ausschließen, ist von ihrer Präsenz auszugehen. Die deutsche TRGS 561 verlangt die Schutzmaßnahmen nach den Abschnitten 4.1 und 4.2 ausdrücklich bereits dann, wenn eine Chrom(VI)-Belastung nicht auszuschließen ist. [19]

In vielen Betrieben wird erst demontiert und dann getestet, oft nur mit unzuverlässigen Schnelltests (Abschnitt 19). Der Arbeitsschutz verlangt die umgekehrte Reihenfolge: Die Situation ist vor Beginn der Arbeiten in der Gefährdungsbeurteilung zu bewerten. Die deutsche TRGS 561 verlangt die Schutzmaßnahmen bereits, wenn eine Chrom(VI)-Belastung nicht auszuschließen ist; ein negativer Test hebt diese Verdachtslage nicht auf, zumal sich Chromate auch im Inneren der Dämmelemente bilden können. [11, 19, 36]

### Einstufung: Gruppe und Einzelverbindung

Für den Arbeits- und Umweltschutz ist die genaue Verbindung nicht entscheidend. Die harmonisierte europäische Einstufung erfasst Chrom(VI)-Verbindungen als Gruppe als krebserzeugend der Kategorie 1B, mit Ausnahme von Bariumchromat und der gesondert aufgeführten Verbindungen; Calciumchromat ist selbst gesondert als krebserzeugend der Kategorie 1B eingestuft. Die Beurteilungsmaßstäbe nach der deutschen TRGS 910 beziehen sich auf den Elementgehalt von Chrom, nicht auf die Verbindung. Hier kann man wieder allgemein von Chrom(VI) sprechen, so wie bei Asbest. [63, 64, 71]

Als Aufnahmewege nennt das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) für Chrom(VI)-Verbindungen „inhalativ, hautresorptiv“. Für schwellenwertfreie Karzinogene gibt es keine Dosis ohne Risiko; ein Chromat ist weder nur ein wenig krebserzeugend noch nur ein wenig hautresorptiv. [71]

Unterschiede bestehen in den übrigen Einstufungen. Natriumchromat ist zusätzlich als keimzellmutagen und reproduktionstoxisch der Kategorie 1B eingestuft, außerdem unter anderem als akut toxisch, ätzend und sensibilisierend. Es steht auf der Kandidatenliste der besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHC) und in Anhang XIV der REACH-Verordnung; seine Verwendung ist zulassungspflichtig. Calciumchromat steht auf keiner der beiden Listen, obwohl seine Einstufung als krebserzeugend der Kategorie 1B allein für die Identifizierung als SVHC ausreichen würde (Artikel 57 Buchstabe a REACH). [64-67]

Mit der geplanten Beschränkung werden die Chrom(VI)-Stoffe aus der Zulassung in Anhang XVII der REACH-Verordnung überführt, also in denselben Anhang, der unter Eintrag 6 die Asbestfasern aufführt. Nach den vorliegenden Zusammenfassungen umfasst der Vorschlag die Salze der Chrom- und Dichromsäure und damit auch Calciumchromat; ausgenommen sind die drei Bleichromat-Einträge. [59, 66, 68]

### Natriumchromat in Dämmstoffen: die Verwendungsfrage

Bei natriumhaltigen Dämmstoffen wie Mineralwolle ist die Bildung von Natriumchromat nicht auszuschließen; Sayano et al. haben  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  an der Grenzfläche zwischen Metall und natriumhaltigem Dämmstoff identifiziert. Der Staub einer solchen Dämmung ist ein Gemisch; gebildetes Chromat liegt als eigener Stoff lose vor. Beides ist kein Erzeugnis im Sinne von Artikel 3 Nummer 3 der REACH-Verordnung, da es keine bestimmte Form hat. Natriumchromat steht als besonders besorgniserregender Stoff bereits heute in Anhang XIV der REACH-Verordnung; seine Verwendung ist zulassungspflichtig. Wird eine solche Dämmung ausgebaut, gelagert und wiederverwendet, ist sie kein Abfall. Ist das nicht schon heute eine zulassungspflichtige Verwendung? Für den Arbeitsschutz stellt sich diese Frage nicht: Hier gilt die Vorgabe der deutschen TRGS 561, die Schutzmaßnahmen bereits bei einer nicht auszuschließenden Chrom(VI)-Belastung verlangt. [11, 19, 60, 66]

### Natriumchromat in Aschen: die Abfalleinstufung

Auch in chromathaltigen Aschen ist Natriumchromat nicht auszuschließen; eine Verwendungsfrage stellt sich dort nicht. Ob ein Abfall gefährlich ist, richtet sich nach Anhang III der europäischen Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG und damit nach der CLP-Einstufung der enthaltenen Stoffe, nicht nach ihrer SVHC-Eigenschaft. Beide Chromate führen ab 0,1 % über das Kriterium HP7 (krebserzeugend) zur Einstufung als gefährlicher Abfall. Natriumchromat erfüllt zusätzlich HP11 (keimzellmutagen, ab 0,1 %) und HP10 (reproduktionstoxisch, ab 0,3 %), ohne die maßgebliche Schwelle zu senken. [69]

Gemessen wird der Cr(VI)-Gehalt, die Schwelle gilt aber für die Verbindung. Chrom macht in Calciumchromat etwa 33 %, in Natriumchromat etwa 32 % der Masse aus; 0,1 % Chromat entsprechen damit rund 0,03 % Cr(VI). Die Frage, welches Chromat vorliegt, ist auch hier praktisch unerheblich. Relevant ist dies vor allem für Rostasche, für die das europäische Abfallverzeichnis einen gefährlichen und einen nicht gefährlichen Eintrag vorsieht (19 01 11\* und 19 01 12). Erfasst die Bewertung im Einzelfall den Cr(VI)-Gehalt, und rechnet sie ihn auf die Verbindung um? [70]

### Mutterschutz

Die Konsequenz reicht bis in den Mutterschutz. Nach § 11 Absatz 1 des deutschen Mutterschutzgesetzes (MuSchG) liegt eine unverantwortbare Gefährdung für schwangere Frauen unter anderem bei Stoffen vor, die als karzinogen, keimzellmutagen oder reproduktionstoxisch der Kategorien 1A oder 1B oder als akut toxisch der Kategorien 1 bis 3 eingestuft sind. Calciumchromat erfüllt dies als krebserzeugend der Kategorie 1B, Natriumchromat zusätzlich als keimzellmutagen, reproduktionstoxisch und akut toxisch. Die Ausnahme bei eingehaltenem Arbeitsplatzgrenzwert greift nicht, da für Chrom(VI)-Verbindungen kein solcher Grenzwert besteht, sondern ein risikobasierter Beurteilungsmaßstab nach der deutschen TRGS 910. [63, 71, 73]

Ist die Präsenz eines dieser Chromate nicht auszuschließen, dürfen schwangere Frauen Tätigkeiten wie Wartung, Ausbau, Revision, Reinigung oder Aschehandhabung in diesen Bereichen nicht ausführen. Für stillende Frauen empfiehlt das IFA aus Vorsorge, ebenfalls keine Exposition gegenüber krebserzeugenden Stoffen der Kategorien 1A und 1B zuzulassen. Nach § 10 MuSchG ist die Gefährdung für jede Tätigkeit zu beurteilen, der eine Frau ausgesetzt ist oder sein kann. [72, 73]

## 4. Anwendungsfelder und zu erwartende Chromate

Die folgende Übersicht ordnet typische Anwendungsfelder den dort eingesetzten Dämmstoffen und den zu erwartenden Chromaten zu. Maßgeblich ist jeweils die Kombination aus chromlegiertem Heißeil, basischer Komponente, Sauerstoff und Temperatur. E-Glas, Calciumsilikat und AES-Wollen wie Superwool enthalten vor allem Calciumoxid, Mineralwolle enthält Calcium- und Natriumoxid. Sayano et al. haben am calciumhaltigen Dämmstoff  $\text{CaCrO}_4$  und am natriumhaltigen Dämmstoff  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  identifiziert. [11]

| Anwendungsfeld                                        | Dämmung oder Ort (basische Komponente)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Zu erwartende Chromate                                                                                    | Verwendungs- und Abfallfrage                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gas- und Dieselmotoren, Lokomotiv- und Schiffsmotoren | Am und auf dem Motor meist E-Glas und Glasfasernadelmatten ( $\text{CaO}$ ), im Hochtemperaturbereich Calciumsilikatmatten und Superwool ( $\text{CaO}$ ); weiterführende Abgasleitungen mit Mineralwolle ( $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ) als Bahnenware; Isolierkissen und Isoliermatratzen aus Glasgewebe ( $\text{CaO}$ ) und Mineralwolle ( $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ ) | Am und auf dem Motor vor allem Calciumchromat; an Zu- und Abgasleitungen Calcium- und/oder Natriumchromat | Bei Wartungsarbeiten schon heute die REACH-Verwendungsfrage zu Natriumchromat, wenn ausgebaut Mineralwolleprodukte wiederverwendet werden; mit der geplanten ECHA-Beschränkung in ihrer jetzigen Form unabhängig vom einzelnen Chromat |

| Anwendungsfeld                                                                                               | Dämmung oder Ort (basische Komponente)                                                                                                                                                                                                                                | Zu erwartende Chromate                              | Verwendungs- und Abfallfrage                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Gas- und Dampfturbinen</b>                                                                                | In sehr heißen Bereichen hochcalciumhaltige Calciumsilikatprodukte; anschließende Isoliermatratzen oft aus E-Glas- und Mineralwolleprodukten                                                                                                                          | Calcium- und/oder Natriumchromat                    | wie bei Motoren                                                                                                                                                          |
| <b>Biogasanlagen, BHKW und KWK</b>                                                                           | wie bei Motoren und Turbinen                                                                                                                                                                                                                                          | wie bei Motoren und Turbinen                        | wie bei Motoren                                                                                                                                                          |
| <b>Lebensmittelverarbeitung, Gewächshäuser und Plantagen mit BHKW</b>                                        | wie bei BHKW                                                                                                                                                                                                                                                          | wie bei BHKW                                        | wie bei Motoren                                                                                                                                                          |
| <b>Rechenzentren, Notstromaggregate, dezentrale Energieversorgung öffentlicher Gebäude und Krankenhäuser</b> | wie bei BHKW, KWK und Turbinen                                                                                                                                                                                                                                        | wie bei BHKW, KWK und Turbinen                      | wie bei Motoren                                                                                                                                                          |
| <b>Fahrzeuge, Baumaschinen, Abgasnachbehandlung</b>                                                          | Hitzeschilde, etwa am Turbolader, mit vor allem calciumoxidhaltigen Filzen und Matten, teils Calciumsilikat-Aufbauten; Außendämmung an DPF und SCR; geclipste, sauerstoffoffene Doppelwandungen von Heißeilen mit innenliegenden Dämmstoffen (E-Glas, Calciumsilikat) | vor allem Calciumchromat                            | wie bei Motoren                                                                                                                                                          |
| <b>Müllverbrennung</b>                                                                                       | Ofen bei Revisionen, Türbereich, Bodenbereich der Ofenzugänge und Peripherie der Öfen durch Verwirbelung (Rückstände, keine Dämmung)                                                                                                                                  | Die einzelnen Chromate sind hier nicht entscheidend | Abfall und Reinigung; eine Verwendungsfrage stellt sich höchstens bei der Weiterverwendung von Aschen als Bestandteil anderer Produkte, sofern sie nicht entsorgt werden |

### Weiter zu fassende Gefährdungsbeurteilung

Bei Biogasanlagen mit angeschlossener Landwirtschaft ist die Gefährdungsbeurteilung weiter zu fassen: Einzubeziehende sind die Verschleppung in Betriebsbereiche und Nahrungsmittel sowie die Umweltbelastung.

In der Lebensmittelverarbeitung, in Gewächshäusern und Plantagen kann hohe Luftfeuchte durch Bewässerung oder Bedampfung die Bildung und den Gasphasentransport an den Heißeilen begünstigen. Die deutsche Berufsgenossenschaft BG ETEM nennt Luftfeuchtigkeit und ab etwa 550 °C Wasserdampf als Einflussgrößen; Tatar arbeitet mit stark befeuchteter Luft (Abschnitt 14). [2, 35]

Rechenzentren werden wegen ihres hohen Energiebedarfs zunehmend mit eigener Energieversorgung aus Gasmotoren oder Gasturbinen ausgestattet. Motorenhersteller begründen den wachsenden Bedarf an schnell verfügbarer Eigenversorgung mit der begrenzten Netzkapazität. Diese Anlagen sind wie BHKW und KWK gedämmt. [74]

Notstromaggregate und die dezentrale Energieversorgung mit BHKW- und KWK-Technik in öffentlichen Gebäuden und Krankenhäusern entsprechen derselben Konstellation. In Krankenhäusern betrifft eine Verschleppung Bereiche mit vulnerablen Gruppen.

Eine Besonderheit in den Niederlanden: Heizungsanlagen werden häufig mit textilen Dämmungen aus E-Glas oder Mineralwolle ausgestattet. Maßgeblich sind dort die Heißeile wie Brennraum und Abgasweg, an denen die für die Chromatbildung erforderlichen Temperaturen erreicht werden.

## 5. Warum das Thema nicht erkannt wird

Für die fehlende Wahrnehmung lassen sich aus den ausgewerteten Unterlagen mehrere Gründe benennen. Jeder hat für sich eine nachvollziehbare Erklärung; zusammen führen sie dazu, dass der Bildungsweg dort nicht gesucht wird, wo er naheliegt.

### Der Sammelbegriff „Chrom(VI)“

Gesprochen wird pauschal von „Chrom(VI)“. Der Begriff ist mit industriell hergestellten Verbindungen verknüpft; die im eigenen Betrieb gebildeten Calcium- und Natriumchromate kommen in diesem Bild nicht vor (Abschnitt 3).

### Wahrnehmung allein der industriell hergestellten Form

Industriell hergestellte Chromate unterliegen Zulassung, Überwachung und Kennzeichnung. In situ gebildete Chromate haben keinen Hersteller, keine Kennzeichnung und kein Sicherheitsdatenblatt, das den Zustand nach Gebrauch beschreibt. Die Sicherheitsinformation eines Dämmstoffs beschreibt den Lieferzustand; ein nicht eingestuftes Dämmstoff kann nach Gebrauch mit neu gebildeten Gefahrstoffen belastet sein (Abschnitte 16 und 25).

### Prüfziel Materialbeständigkeit

Kompatibilitätsprüfungen von Dämmstoffen mit Chrom bewerten die Beständigkeit der Faser. Eine äußerlich beständige Faser kann jedoch eine geringe Menge eines hochgefährlichen Reaktionsprodukts tragen. Wird Cr(VI) nicht bestimmt, beantwortet die Prüfung die Gefahrstofffrage nicht (Abschnitt 12).

### Der Bildungsweg als „nicht nachvollziehbar“

Einzelne Herstellerdokumente erklären die Entstehung als „nicht vollständig“ oder „im Allgemeinen noch nicht nachvollziehbar“ und verweisen auf externe Quellen wie Ersatzteile, Wartungsmaterialien oder Betriebsumgebungen. Damit erscheint die Exposition als Einzelfall, obwohl der Bildungsweg publiziert ist (Abschnitt 16).

### Schnelltest-Philosophie

Schutzmaßnahmen werden an sichtbare gelbe Ablagerungen und positive Schnelltests gekoppelt. Fehlt die Farbe oder ist der Test negativ, gilt der Befund als unauffällig. Die französische Feldstudie zeigt, dass kolorimetrische Schnelltests laboranalytisch nachgewiesenes Cr(VI) übersehen (Abschnitt 19).

### „Neutralisierung“ und WD-40

Die Empfehlung, Chrom(VI) zu „neutralisieren“, und der Einsatz von WD-40 vermitteln den Eindruck, das Problem sei vor Ort lösbar. Die „Neutralisierung“ ist eine Reduktion zu Chrom(III), die nur unter günstigen Bedingungen nahezu vollständig gelingt; für WD-40 ist eine Reduktionswirkung experimentell widerlegt (Abschnitt 26).

### „Asbestfrei“ als Unbedenklichkeitsmerkmal

Die Asbestsubstitution beseitigte die Asbestfaser, nicht zwangsläufig das reaktive Materialsystem aus chromlegiertem Heißeil und basischer Dämmung. „Asbestfrei“ ist keine Aussage darüber, ob ein Dämmstoff auf chromlegierten Heißeilen zur Chromatbildung beiträgt (Abschnitt 15).

### Umweltbewertung statt Tätigkeitsbewertung bei Verbrennungsrückständen

Bei Aschen steht die Umweltbewertung über die Auslaugung im Vordergrund, etwa im europäischen BVT-Merkblatt. Sie beantwortet nicht die Exposition bei Revision, Kesselöffnung, Reinigung und Aschehandhabung. Feldbeobachtungen in europäischen Müllverbrennungsanlagen zeigen, dass der Schutz gegen Chromatbelastungen allenfalls teilweise umgesetzt wird (Abschnitt 22).

Ob man den Bildungsweg angesichts dieser Quellenlage nicht hätte sehen müssen, ist die Frage, die diese Expertise stellt.

## 6. Warum es zum Thema wird

---

### Deutschland: die deutsche TRGS 561

Seit dem 4. Mai 2026 gilt die deutsche TRGS 561 in neuer Fassung. Abschnitt 3.3.4 beschreibt die Thematik, Abschnitt 5.9.3 nennt Alkali-/Erdalkalimetalloxide aus Dämmstoffen oder Montagepasten als Einflussfaktor. Schutzmaßnahmen nach den Abschnitten 4.1 und 4.2, darunter persönliche Schutzausrüstung, staubarmes Arbeiten und die Substitutionsprüfung, greifen bereits, wenn eine Chrom(VI)-Belastung nicht auszuschließen ist. Für Arbeitgeber in Deutschland ist die Frage damit Teil der Gefährdungsbeurteilung und nicht erst eine Folge eines positiven Befunds (Abschnitt 19). [19]

### EU: Expositionswege, Beschränkung und Verwendungsbegriff

Die europäische Richtlinie 2004/37/EG verlangt die Bewertung aller möglichen Expositionen einschließlich der Aufnahme über die Haut (Abschnitt 24). Die Europäische Chemikalienagentur ECHA hat im April 2025 eine Beschränkung von Chrom(VI)-Stoffen vorgeschlagen, nach der nur noch bestimmte Verwendungen unter strengen Bedingungen zulässig bleiben sollen. [18, 59]

Maßgeblich ist der weite Verwendungsbegriff der europäischen REACH-Verordnung, der unter anderem Lagern, Bereithalten und Behandeln umfasst. Wird ein mit Chromaten kontaminiertes Bauteil zur Wartung ausgebaut, gelagert und wieder eingebaut, oder wird eine kontaminierte Dämmung gelagert oder wiederverwendet, kann dies eine Verwendung sein. Fällt sie nicht unter die künftig zulässigen Verwendungen, wäre sie untersagt. Für heutige Isolationssysteme auf chromlegierten Heißeilen kann dies auf ein faktisches Verbot hinauslaufen. Maßgeblich ist der endgültige Rechtstext (Abschnitt 25). [59, 60]

### Australien als Vorläufer

Ab dem 1. Dezember 2026 gibt die australische Behörde Safe Work Australia für Chrom(VI)-Verbindungen keinen Arbeitsplatzgrenzwert mehr aus. An seine Stelle tritt die Pflicht, die Exposition zu beseitigen oder so weit wie vernünftigerweise praktikabel zu minimieren (Abschnitt 25). [58]

### Fahrzeuge und Verbrennungsrückstände

Für Fahrzeuge eröffnen das europäische Verbraucherkaufrecht und die Fahrzeugverordnung 2018/858 eigene Prüfwege, wenn ein Fahrzeug nachweislich mit Cr(VI) kontaminiert ist (Abschnitt 20). Für Verbrennungsrückstände gilt der Arbeitsschutz bei Revision und Reinigung unabhängig von der Umweltbewertung der Asche (Abschnitte 21 und 22). [46, 47]

## B. Grundlagen

### 7. Das Patent von 1938/1939: Calciumchromat als bewusst erzeugtes Reaktionsprodukt

Udy entwickelte das Verfahren zur Herstellung kohlenstoffarmen Ferrochroms. Ausgangspunkt war kohlenstoffhaltiges Ferrochrom. Dieses wurde in fein verteilter Form in Luft geröstet und dabei mit Kalk behandelt. Das Patent beschreibt ausdrücklich, dass die Oxidation des Chroms zu Chromat in Gegenwart von Kalk erfolgt:

**“With lime alone serving as the base the oxidation of chromium to chromate requires several hours of roasting ...”**

Die Patentschrift präzisiert die Temperaturführung weiter:

**“Roasting at temperatures well under 1000° C. with no soda ash or less than one per cent of soda in the roasting charge converts the chromium mostly to calcium chromate ...”**

Sie beschreibt damit unmittelbar die Bildung von Calciumchromat aus einer Chromquelle, Kalk und einer oxidierenden Röstatmosphäre. Zugleich wird festgehalten, dass sich die Produktverteilung mit Temperatur und Einsatzstoffen verändert: Oberhalb 1.000 °C könne Chromat wieder zu Chromit zerfallen. Das Verfahren ist folglich keine unspezifische Oxidation, sondern eine gezielt geführte Reaktionschemie.

Auch die Patentansprüche lassen keinen Zweifel an den bezeichneten Verbindungen. Die Ansprüche 22 und 25 nennen ein Gemisch aus Calciumchromit und Calciumchromat; die Ansprüche 23 und 26 nennen zusätzlich Natriumchromat. Die Chromate sind damit nicht nur in der Beschreibung erwähnt, sondern Bestandteil des beanspruchten technischen Verfahrens.

### 8. Natrium: Beschleuniger, Steuerstoff und Chromatbildner

Das Patent nennt Soda beziehungsweise Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ausdrücklich als Einflussgröße. Soda beschleunigt und steuert die Oxidation zu Chromat. Nach der Patentschrift kann mit einer ausreichenden Sodazugabe die Umsetzung zu Chromat bei oder knapp unter 1.000 °C wesentlich beschleunigt werden. Bei einer Zugabe von 5 bis 10 Gewichtsprozent Soda, bezogen auf das Ferrochrom, beschreibt Udy bei 1.000 °C eine etwa hälftige Umsetzung des Chroms zu Chromat; der verbleibende Anteil liegt im Chromit-/ $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -Zustand vor.

Natrium ist damit ein prozesschemisch wirksamer Bestandteil, der die Chromatbildung fördern und steuern kann. Die Angaben zu Calciumchromat ohne Soda stehen in Abschnitt 7; Natriumchromat wird zusätzlich in den Patentansprüchen geführt. [1]

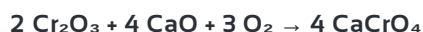
### 9. Der chemische Kern des Bildungswegs

Der in der Patentschrift beschriebene Röstprozess beruht auf vier Faktoren:

1. einer Chromquelle,

2. einer basischen Calcium- und/oder Natriumverbindung,
3. einer oxidierenden Atmosphäre, insbesondere Sauerstoff, und
4. ausreichender Temperatur und Reaktionszeit.

Vereinfacht lässt sich der zentrale Calciumchromat bildende Teilprozess wie folgt darstellen:



Für Natriumchromat lässt sich der korrespondierende Oxidationsweg bei Verwendung von Natriumcarbonat schematisch formulieren:



Diese Gleichungen sind Stoffbilanzen des Chromatbildungswegs, nicht eine Behauptung, dass jede reale Anlagenoberfläche einem idealisierten Reinsystem entspricht. Sie zeigen jedoch den seit langem bekannten chemischen Zusammenhang: Cr(III)-haltige Chromquelle, Base und Sauerstoff bilden unter thermischer Beanspruchung einen Chromat-Chrom(VI)-Pfad.

Ein als CaO ausgewiesener Calciumgehalt in Glas oder Silikat bedeutet nicht automatisch, dass freies Calciumoxid vorliegt. Für die anwendungsbezogene Bewertung ist die Reaktionsverfügbarkeit maßgeblich. Auch Calciumsilikate können Calcium für die Chromatbildung liefern; Sayano beschreibt entsprechende Reaktionen. [11]

## 10. Direkter experimenteller Nachweis: von der Modellmischung zur Metall-Dämmstoff-Grenzfläche

Die historische Patentschrift beschreibt den Reaktionsweg. Vier Primärstudien bestätigen ihn experimentell auf unterschiedlichen Ebenen und schließen die Belegkette vom Modellversuch bis zur realitätsnahen Grenzfläche.

| Studie                  | Untersuchte Konstellation                                                                                             | Zentraler Befund                                                                                                                                                                | Bedeutung                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paoletti (2002)         | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mit CaO in synthetischer Luft und in inerter Atmosphäre; Thermowaage (TG-DSC) und XRD. | Schnelle Massenzunahme zwischen 500 und 850 °C; XRD weist nach 850 °C CaCrO <sub>4</sub> nach. In inerter Atmosphäre nur dreiwertiges Ca(CrO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> . [50] | Früher direkter Phasennachweis von CaCrO <sub>4</sub> aus Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> und CaO; Sauerstoff als zwingende Voraussetzung belegt. Die Arbeit entstand zur Hausmüllverbrennung; Rostaschen und Pilotanlage siehe Abschnitt „Paoletti 2002“ bei den Verbrennungsgaschen. |
| Verbinnen et al. (2013) | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mit CaO, NaOH oder KOH unter thermischer Behandlung.                                   | Mit NaOH wurden nach 60 Minuten 83 % bei 500 °C und 89 % bei 700 °C als Cr(VI) ausgelaugt. Auch CaO eröffnet den Chromatbildungsweg.                                            | Belegt den thermisch-oxidativen Bildungsweg mit Calcium- und Natriumverbindungen und die Rolle des Sauerstoffs.                                                                                                                                                                       |

| Studie               | Untersuchte Konstellation                                                                                | Zentraler Befund                                                                                                                                                                      | Bedeutung                                                                                              |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mao et al. (2015)    | Chromhaltiger Schlamm mit CaO, 200-1.200 °C.                                                             | Zwischen 500 und 900 °C entsteht auslaugbares CaCrO <sub>4</sub> ; bei 900 °C wurde nach einer Stunde die maximale Cr(III)-Oxidation beobachtet.                                      | Belegt die unmittelbare Rolle von CaO und die ausgeprägte Temperaturabhängigkeit.                      |
| Sayano et al. (2015) | Direkter Kontakt Cr-haltiger Stähle mit Ca-Si-O-bzw. Na-haltigen Dämmstoffen; bis 5.000 h bei 773/873 K. | Gelbliche Reaktionsprodukte wurden mittels XRD als CaCrO <sub>4</sub> bzw. Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> identifiziert. Die Cr(VI)-Menge hängt von Metall, Temperatur und Zeit ab. | Direkter experimenteller Nachweis an der Grenzfläche zwischen chromhaltigem Metall und Wärmedämmstoff. |

### Verbinnen et al.: Die Rolle basischer Calcium- und Natriumverbindungen

Verbinnen, Billen, Van Coninckxloo und Vandecasteele untersuchten die Temperaturabhängigkeit der Cr(III)-Oxidation in synthetischen Mischungen aus Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Alkali- beziehungsweise Erdalkaliverbindungen. Die Studie trennt einen oft verwischten Punkt klar: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird durch Luftsauerstoff allein im relevanten Temperaturbereich nicht ohne Weiteres zu Cr(VI) oxidiert. Die basische Calcium-, Natrium- oder Kaliumkomponente eröffnet den Chromatbildungsweg.

Die Experimente ergaben maximale Cr(VI)-Auslaugungen in der Größenordnung von 600 bis 800 °C. Unter inerter Atmosphäre sank die Cr(VI)-Auslaugung eines industriellen Schlammes nach 30 Minuten bei 700 °C von 24,2 mg/kg auf 0,42 mg/kg. Damit ist die Rolle des Sauerstoffs nicht nur thermodynamisch postuliert, sondern experimentell belegt.

Die quantitativen Angaben sind als Auslaugungsbefunde mit der jeweiligen Temperatur und Haltezeit zu lesen; sie sind keine pauschalen Umsatzwerte für industrielle Dämmungen. [9]

### Mao et al.: CaO bildet im Temperaturfenster von 500 bis 900 °C CaCrO<sub>4</sub>

Mao, Gao, Deng und weitere Autoren untersuchten chromhaltigen Schlamm in Gegenwart von CaO über den Bereich von 200 bis 1.200 °C. Sie unterscheiden zwei relevante Reaktionsbereiche:

- Zwischen 200 und 400 °C entstand bei Chromhydroxid/CaO-Mischungen ein Cr(VI)-haltiges Zwischenoxid (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+X).
- Zwischen 500 und 900 °C reagierte Cr(III) unmittelbar mit CaO zu auslaugbarem CaCrO<sub>4</sub>. Bei 900 °C wurde nach einer Stunde die maximale Oxidation beobachtet; eine Verlängerung der Haltezeit verringerte die Calciumchromatmenge in diesem Bereich nicht wesentlich.

Die Studie bestätigt damit, dass Calciumoxid nicht nur eine begünstigende Hintergrundkomponente ist, sondern ein direkter Reaktionspartner bei der Bildung von Calciumchromat.

### Sayano et al.: der unmittelbare Nachweis am Kontakt zwischen Heißteil und Dämmstoff

Die Arbeit der japanischen Autoren Sayano, Kanno, Inagaki, Takahashi und Yoshida ist für die Bewertung hochtemperaturgedämmter Industriekomponenten besonders bedeutsam. Untersucht wurde nicht ein Schlamm oder eine lose Laborpulvermischung, sondern der direkte Kontakt zwischen Cr-haltigen Metallen und Wärmedämmstoffen.

Die Autoren setzten unter anderem SUS304 mit 18,2 % Cr sowie niedrig- und hochchromhaltige Stähle auf calcium-silikatische und natriumhaltige Dämmstoffe. Der calcium-silikatische Blockdämmstoff wies 35 % CaO aus; ein natriumhaltiger Dämmstoff 7,3 % Na<sub>2</sub>O. Nach Wärmebehandlung in Luft wurden an den Kontaktflächen gelbliche Reaktionsprodukte nachgewiesen:

- Beim calciumhaltigen Dämmstoff identifizierte die XRD-Analyse CaCrO<sub>4</sub>, beim natriumhaltigen Dämmstoff Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>.
- Bei SUS304 und calcium-silikatischem Dämmstoff wurden nach 1.000 Stunden bei 873 K (rund 600 °C) 160 mg Cr(VI) pro m<sup>2</sup> Kontaktfläche gemessen.
- Nach 5.000 Stunden bei 873 K betrug die Cr(VI)-Menge am unbeschichteten SUS304-/Ca-Si-O-System 940 mg/m<sup>2</sup>; mit dem weiteren calciumhaltigen, selbsthärtenden Beschichtungsdämmstoff 3.890 mg/m<sup>2</sup>.

Die Autoren zeigen zudem den Stofftransport: Chrom diffundiert aus dem Metall in den Dämmstoff, oxidiert und reagiert mit der basischen Dämmstoffkomponente. Eine nur etwa 3-4 µm dicke Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-basierte Sperrschicht unterband diese Chromdiffusion und verhinderte die Cr(VI)-Bildung nahezu vollständig. Damit ist auch die präventive Logik klar: Nicht die nachträgliche Behandlung bereits entstandener Chromate, sondern die Unterbindung des Reaktionskontakts beziehungsweise die Substitution basischer Oxide verhindert den Stoffentstehungspfad.

### Konsequenz aus der Gesamtschau

Die vier Studien lassen keinen Raum für die Darstellung, die Bildung von Calcium- und Natriumchromat an chromhaltigen Heißeilen sei lediglich eine ungeprüfte Möglichkeit. Die Reaktion ist

1. chemisch beschrieben (Udy; Verbinnen),
2. temperaturabhängig experimentell nachgewiesen (Paoletti; Mao; Verbinnen) und
3. an der Metall-Dämmstoff-Grenzfläche mit identifizierten Zielprodukten CaCrO<sub>4</sub> und Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> direkt beobachtet (Sayano).

## C. Isoliertechnik: Heiteile und Dämmung

### II. Von der metallurgischen Rstung zur Hochtemperaturdämmung

Die historische Patentschrift beschreibt eine bewusst intensivierte metallurgische Rstung. Ihre Bedeutung für Dämmstoffe auf chromlegierten Heiteilen liegt in der Reaktionschemie: Die für Calcium- und Natriumchromat maßgeblichen Stoffgruppen sind identisch.

| Metallurgischer Prozess nach Udy | Heißteil mit basischer Dämmung                                                            |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chromhaltiges Ferrochrom         | Chromlegierter Stahl, Edelstahl, hochchromlegierte Oberflächen und Oxidschichten          |
| Kalk bzw. Calciumoxid            | Calciumhaltige Fasern, Füllstoffe, Bindemittel oder andere basische Dmmstoffbestandteile |
| Soda bzw. Natriumcarbonat        | Natriumhaltige Glas-, Faser-, Binder- oder sonstige Produktbestandteile                   |
| Rstung in Luft                  | Sauerstoffzutritt im Anlagenumfeld und im Grenzbereich von Bauteil und Dämmung            |
| Temperatur und Verweilzeit       | Betriebstemperatur, Temperaturzyklen und lange Einsatzzeiten                              |

Die deutsche Berufsgenossenschaft BG ETEM beschreibt den heutigen anlagenbezogenen Befund entsprechend: Durch den Kontakt chromlegierter Sthle mit alkali- und erdalkalimetallhaltigen Dämmstoffen oder Montagepasten kann es bei Stahltemperaturen von etwa 350 bis 800 °C zur Bildung krebserzeugender Chromate kommen. Als Einflussgroen nennt sie den Chromanteil im Stahl, Calcium-, Magnesium-, Natrium- oder Kaliumverbindungen, Sauerstoff, Luftfeuchtigkeit und ab etwa 550 °C auch Wasserdampf. Sichtbare gelbliche Ablagerungen an Turbinen und Dampfdruckleitungen wiesen nach Angaben der BG ETEM auf Calciumchromat hin und wurden anschließend positiv auf Chrom(VI)-Verbindungen beprobt. [2]

#### Der Anwendungsbezug war vor 2015 ausdrücklich publiziert

Toshibas japanische Patentanmeldung JP2011232021A, veröffentlicht am 17. November 2011 mit Priorität vom 8. April 2010, beschreibt genau diese Grenzfläche: Chromoxid auf Edelstahl reagiert mit der Calciumkomponente einer Wärmedämmung unter Sauerstoff zu Calciumchromat. Die Schrift erläutert den Wechsel von Asbest zu Calciumsilikat und schlägt eine keramische Trennschicht zur Unterdrückung der Cr(VI)-Bildung vor. Sie nennt außerdem kalium-, magnesium- und natriumhaltige Dämmungen. Damit war auch die anwendungsbezogene Problemstellung einschließlich eines Prventionsansatzes vor der Studie von 2015 öffentlich zugänglich. [26]

Als frühere Literatur nennt das Patent Corrosion Center News Nr. 034 vom 1. Juni 2005. Dieser Hinweis ist eine gezielte Archivspur; die Originalausgabe wurde hier nicht eingesehen. Die nachgewiesene Patentfamilie ist japanisch. Ihre öffentliche Verfügbarkeit ist von der tatsächlichen Kenntnis einzelner europäischer Hersteller zu unterscheiden. [26]

### Prüfung beider Toshiba-Patente und des Hinweises „Handelsname Rockwool“

Der Hinweis „Wärmedämmstoff (Handelsbezeichnung: Rockwool)“ ist in beiden vorgelegten Übersetzungen enthalten. Die entsprechende Produktbezeichnung steht auch im japanischen Original von JP2011232021A und in der japanischen erteilten Fassung JP5774355B2 zur zweiten Anmeldung JP2012220174A. Der Hinweis wurde somit nicht erst durch die maschinelle Übersetzung erzeugt. Beide Versuchsbeschreibungen charakterisieren die Dämmung als hauptsächlich calciumoxid-/siliciumoxidbasiert. [26, 38]

JP2011232021A prüft SUS304 mit und ohne keramische Trennschichten bei 600 °C über 500 Stunden in Luft. Im unbeschichteten Vergleich wird an der Kontaktfläche mittels Röntgendiffraktion ein Calcium-Chrom-Komplexoxid und in kleiner Menge ein Magnesium-Chrom-Komplexoxid beschrieben. Die Schrift erläutert den  $\text{CaCrO}_4$ -Bildungsweg ausdrücklich mit Reaktionsgleichung und untersucht ferner natriumhaltige Dämmung. Die keramische Schicht soll den Kontakt der reaktiven Komponenten unterbrechen. [26]

JP2012220174A, veröffentlicht am 12. November 2012 mit Priorität vom 14. April 2011, verfolgt einen weiteren Präventionsansatz: Eine 200 µm dicke Reinnickelfolie trennt SUS304 von der Dämmung. Nach 600 °C und 500 Stunden in Luft wird beim unmittelbaren Kontakt ohne Folie ein gelbes Reaktionsprodukt beschrieben. Dieses wird mit XRD analysiert und von den Autoren als Cr(VI)-Reaktionsprodukt bezeichnet. Die Vergleichsversuche mit natriumhaltigem Perlit beziehungsweise Calciumsilikat beschreiben zudem Chrom-Natrium-beziehungsweise Chrom-Calcium-Komplexoxide. Beim Aufbau mit Folie wird keine entsprechende sichtbare Reaktion berichtet. Dieser Vergleich zeigt einen gezielten Eingriff in die Grenzflächenreaktion; aus dem fehlenden Farbbefund folgt für sich genommen kein quantitativer Cr(VI)-Nullwert. [38]

Die Formulierung „Rockwool“ ist dokumentiert; ein Hersteller, eine genaue Produktqualität oder eine Zuordnung zu ProRox wird in diesen Versuchspassagen nicht identifiziert. Im Japanischen wird die Bezeichnung auch für Steinwolle verwendet. Für eine konkrete Unternehmenszuordnung wären Produkt- und Lieferantendaten nachzuziehen. Der technische Befund bleibt davon unabhängig: Toshiba untersucht calciumhaltige Dämmung auf chromhaltigem Metall und beschreibt konkrete Möglichkeiten, die Reaktion zu unterbrechen. [26, 38]

Beide Schriften nennen ausdrücklich Müllverbrennungsanlagen, Biomassefeuerungen, thermische Kraftwerksanlagen und Chemieanlagen. Die Verbindung zum Verbrennungsbereich ist damit bereits Teil der ursprünglichen Anwendungsbeschreibung. Dabei ist die Reaktion zwischen Dämmung und Metall von einer Cr(VI)-Bildung in der Aschematrix zu unterscheiden; beide können in derselben Anlage relevant sein. [26, 38]

## 12. Bedeutung für E-Glasgewebe, Calciumsilikat, Mineralwolle und Aerogel-Dämmsysteme

Die Bezeichnung einer Produktklasse ist keine Aussage über die chemische Unbedenklichkeit des einzelnen Produkts. Entscheidend sind die tatsächlich eingesetzten Rohstoffe, Fasern, Träger, Bindemittel und Füllstoffe.

Enthalten E-Glasgewebe, Calciumsilikat-Produkte, Mineralwolleprodukte oder aerogelbasierte Dämmsysteme nachweislich basische Oxidanteile, insbesondere Calcium-und/oder Natriumanteile, sind diese bei Verwendung auf chromlegierten Heißeilen als Hinweis auf ein nicht auszuschließendes Chromatbildungsrisiko zu bewerten. Reaktionsverfügbarkeit, Temperatur, Zeit und Sauerstoff bestimmen die konkrete Ausprägung. Die materialbedingte Verdachtslage ist unabhängig von einem vorherigen positiven Schnelltest in die Gefährdungsbeurteilung einzubeziehen. [19]

Dies gilt auch für aerogelbasierte Produkte. Ein Aerogel-Kern ändert die Bewertung nicht, wenn das vermarktete Gesamtsystem beispielsweise Glasfaserträger, Gewebe, Binder, Füllstoffe oder Beschichtungen mit basischen Oxidanteilen enthält. Maßgeblich ist die Zusammensetzung des konkreten Dämmprodukts im vorgesehenen Einsatzsystem, nicht seine werbliche Bezeichnung.

### Prüfziel Materialbeständigkeit oder Gefahrstoffentstehung?

Morgans Superwool Technical Manual enthält eine eigene Contamination / Pollution Study. Chrompulver wurde zwischen Dämmmatten eingebracht; nach sechs Stunden bei 1.000, 1.100 und 1.150 °C wurden Verpulverung, Schmelzen, Verfärbung und sichtbare Reaktionszeichen bewertet. Die Chromzeile ist für die vier untersuchten Faserprodukte als ohne beobachtete Reaktion ausgewiesen, darunter Calcium- und Calcium-/Magnesiumsilikatfasern. Eine Cr(VI)-Bestimmung mit Nachweisgrenze wird nicht beschrieben. [27]

Die fachliche Konsequenz liegt im Prüfziel: Eine äußerlich beständige Faser kann eine geringe Menge eines gefährlichen Reaktionsprodukts tragen. Der beschriebene Befund beantwortet die Frage nach Chromatbildung deshalb nicht. Auch unterscheiden sich Temperatur und Dauer erheblich von Sayanos Langzeitversuchen bei 500 beziehungsweise 600 °C. [11, 27]

Das Manual wirbt zugleich mit fehlender GefahrstoffEinstufung und nicht gefährlichem Abfall. Solche Aussagen zur Faserchemie ersetzen keine Bewertung des nach Einsatz kontaminierten Dämmsystems. Es handelt sich um eine öffentliche Konzernunterlage mit europäischem Rechtsbezug. Eine gesicherte Erstveröffentlichung lässt sich dem geprüften Auszug nicht entnehmen. [27]

### 13. Das Dilemma der Dämmstoffhersteller

Calciumoxid und Natriumoxid sind keine Zusätze, die man aus einer Rezeptur streicht wie ein Farbpigment. Sie sind seit der frühen Glasherstellung konstitutive Bestandteile der Schmelze, aus der Fasern gezogen oder geschleudert werden.

Die Zusammensetzung dieser Schmelze ist nicht neu. Kalk-Natron-Silikatglas ist der älteste bekannte Glastyp überhaupt; er ist seit der späten Bronzezeit aus Mesopotamien und Ägypten belegt und bleibt vom zweiten Jahrtausend vor Christus bis in die Neuzeit der vorherrschende Typ. Das Flussmittel lieferte zunächst Natron, später Pflanzenasche, beides Natriumquellen; der Kalk kam über kalkhaltigen Sand, zugesetzte Muschelschalen oder Kalkstein hinein und lag typischerweise bei 5 bis 10 Prozent. Seine Aufgabe ist dieselbe wie heute: Er setzt die Wasserlöslichkeit des Glases herab. [80]

Die Faser daraus ist jünger. Schlacken- und Steinwolle wurde erstmals 1840 in Wales hergestellt; in England liefen bis 1885 kommerzielle Betriebe, in Deutschland bald danach, und das erste erfolgreiche kommerzielle Werk in den Vereinigten Staaten nahm 1897 den Betrieb auf. Die Glaswolle folgte 1932 mit dem dampfgeblasenen Verfahren bei Owens-Illinois; 1938 entstand daraus die Owens Corning Fiberglas Corporation. [81, 82]

Das Ziehen eines Fadens aus zähflüssigem Glas war dagegen schon in Ägypten und Venedig bekannt. Übernommen wurde damit nicht die Maschine, sondern die Rezeptur: Ein Faden lässt sich nur aus einer Schmelze ziehen, die bei beherrschbarer Temperatur die passende Viskosität hat. Genau dafür sind Natrium- und Calciumoxid da.

Chemisch wirken sie als Netzwerkwandler. Sie brechen das Siliciumdioxid-Netzwerk auf, setzen Viskosität und Schmelztemperatur herab und machen die Schmelze überhaupt erst verarbeitbar. Natriumoxid ist dabei das klassische Flussmittel, Calciumoxid stabilisiert zusätzlich die chemische Beständigkeit des erstarrten Glases. Ohne diese Oxide bliebe reines Siliciumdioxid ein Werkstoff, der erst weit oberhalb von 1700 °C schmilzt.

Hinzu kommt die Rohstoffseite. Altglas, also Kalk-Natron-Glas aus dem Verpackungskreislauf, ist ein wesentlicher Einsatzstoff der Glaswolleherstellung. Es bringt Calcium und Natrium zwangsläufig mit. Bei Steinwolle liefern Kalkstein und Dolomit dieselben Oxide, bei biolöslichen AES-Wollen ist die Erdalkalibasis sogar namensgebend und Voraussetzung der Biolöslichkeit.

Damit liegt das Problem nicht in einer Beimischung, sondern in der Werkstoffklasse und in der Lieferkette. Wenn die basischen Oxide als Reaktionspartner der Chromatbildung benannt werden, betrifft das nicht ein Produkt, sondern die Grundlage eines Großteils der heutigen Hochtemperaturdämmung.

Und selbst wenn die Rezeptur geändert würde, bliebe ein zweites Problem. Weniger basische Oxide bedeuten eine höhere Schmelztemperatur. Die vorhandene Anlagentechnik, Wannen, Zustellung und Energieführung, ist auf die bisherigen Temperaturen ausgelegt. Eine Umstellung wäre keine Rezepturfrage, sondern eine Investition in die Anlagen.

Fasern ohne nennenswerte basische Oxide gibt es gleichwohl, und zwar seit Jahrzehnten.

Hochkieselsäurefasern mit über 95 Prozent Siliciumdioxid, Aluminiumsilikatfasern im System  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  und polykristalline Aluminiumoxidfasern, die nicht aus der Schmelze, sondern aus einer Vorläuferlösung gesponnen und anschließend gebrannt werden, kommen ohne Flussmittel aus. Der Unterschied liegt nicht in der Chemie, sondern im Anlagenbestand: höhere Schmelztemperatur, andere Wannen, andere Zustellung, höherer Energieeinsatz, geringerer Durchsatz.

Vor diesem Hintergrund ist die Zurückhaltung der heutigen Marktführer gegenüber der in-situ-Bildung nachvollziehbar. Sie kann auch Selbstschutz sein. Nachvollziehbar heißt allerdings nicht folgenlos, denn die Bewertung einer Gefährdung richtet sich nicht danach, wie aufwendig ihre Beseitigung ist.

Damit stellt sich die Frage, die diese Expertise durchzieht, an dieser Stelle am schärfsten: Ab wann weiß man, dass man es nicht mehr nicht wissen kann?

#### 14. Gasphasentransport: Tatar/Gannon und van Leeuwen

Die Bildung einer flüchtigen Cr(VI)-Spezies an einer heißen Chromquelle, ihre Ablagerung auf kühleren Fasern und die Bildung eines Calcium- oder Natriumchromats sind unterschiedliche Reaktionsschritte. Sie können nebeneinander oder nacheinander auftreten. Die Aussage, dass Cr(VI) auch ohne calciumhaltigen Dämmstoff entsteht, ist deshalb von der Frage zu unterscheiden, welche Rolle ein solcher Dämmstoff bei der Bindung, Menge und chemischen Form des abgelagerten Chroms spielt. [11, 35-37]

| Untersuchung                  | Versuchsbedingungen                                                                                                                                                                              | Analytischer Befund / Einordnung                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tatar/Gannon et al. 2018 [35] | Ferritischer T409-Stahl bei 700 °C; feuchte Luft, $p(\text{H}_2\text{O})$ etwa 0,16 bar; 900 Standard- $\text{cm}^3/\text{min}$ ; getrennte Aluminosilikatfasern bei 100-230 °C; 150 h.          | XPS weist Cr(VI) und Cr(III) auf den Fasern nach. Adsorption, Dehydratisierung und Veresterung mit Oberflächen-OH-Gruppen werden als Mechanismus vorgeschlagen. Kein spezifischer Phasennachweis von $\text{CaCrO}_4$ oder $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ im Faserexperiment. |
| van Leeuwen et al. 2024 [36]  | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -Pulver als Quelle; heißer Bereich etwa 800-850 °C; rund 3 Vol.-% Wasser in Luft; etwa 600 $\text{cm}^3/\text{min}$ ; 150 h. Fasern getrennt im kühleren Auslassbereich. | Cr(VI) wird nasschemisch mit Diphenylcarbazid/UV-Vis, Gesamtchrom mittels ICP-OES bestimmt. $\text{CaCrO}_4$ auf calciumhaltigen AES-Fasern wird thermodynamisch modelliert. Gemessenes Cr(VI) und modellierter Phasenbestand sind zu unterscheiden.                     |
| Sayano et al. 2015 [11]       | Direkter Kontakt chromhaltiger Metalle mit calcium-silikatischen oder natriumhaltigen Dämmstoffen; Wärmebehandlung in Luft.                                                                      | $\text{CaCrO}_4$ und $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ werden mittels XRD an der Metall-Dämmstoff-Grenzfläche identifiziert. Dieser Weg ist weder auf Gasphasentransport noch auf die Veresterung von Oberflächengruppen angewiesen.                                             |

Tatar untersucht Chrom-Oxyhydroxid aus einer heißen Stahlquelle und dessen Wechselwirkung mit räumlich getrennten, kühleren Aluminosilikatfasern. Die vorgeschlagene Veresterung betrifft chromathaltige Oberflächenbindungen an Aluminium-/Siliciumzentren; sie ist nicht mit einem Nachweis von Calcium- oder Natriumchromat gleichzusetzen. Die Reaktionsfolge wird aus XPS-Befunden und Literatur hergeleitet. Cr(VI) selbst wurde dabei analytisch festgestellt. [35]

**Wird Tatar als Beleg dafür herangezogen, dass die Dämmstoffchemie für Cr(VI)-Ablagerungen grundsätzlich bedeutungslos sei, überschreitet dies den untersuchten Sachverhalt.** Die Arbeit zeigt einen Bildungs- und Transportweg ohne notwendigen Calciumbeitrag an der heißen Quelle. Sie hebt weder den direkten Grenzflächennachweis von Sayano noch eine spätere Reaktion mit Calcium-/Natriumkomponenten auf. [11, 35]

Van Leeuwen greift Tatar/Gannon ausdrücklich auf und vergleicht Quarz-, Aluminiumoxid- und zwei alkalische Erdalkalisilikat-Fasern (AES). Alle vier Materialien sammeln Cr(VI). Die beiden AES-Proben weisen höhere absolute Cr(VI)-Konzentrationen in den untersuchten Aufschlusslösungen auf als die Quarz- und Aluminiumoxidproben. Der Anteil Cr(VI) am Gesamtchrom steigt jedoch nicht in jeder Probe gleichermaßen: Die Einzelwerte der Tabelle II erlauben eine genauere Aussage als eine pauschale Beschreibung stets höherer Cr(VI)-Anteile bei AES. [36]

| Faserprobe    | Cr(VI), mg/L | Gesamt-Cr, mg/L | Cr(VI)/Gesamt-Cr |
|---------------|--------------|-----------------|------------------|
| Quarz         | 0,739        | 1,339           | 55 %             |
| Aluminiumoxid | 0,403        | 1,976           | 20 %             |
| AES #1        | 0,873        | 2,170           | 40 %             |
| AES #2        | 1,747        | 3,040           | 57 %             |

Werte nach Tabelle II; Prozentanteile aus den veröffentlichten Einzelwerten berechnet und gerundet. Es handelt sich um Konzentrationen in Aufschlusslösungen, nicht um Luftkonzentrationen oder unmittelbar um mg/kg Dämmstoff. Unterschiedliche Fasergeometrien und Probenpositionen sind beim Mengenvergleich zu berücksichtigen. [36]

Die Autoren modellieren mit FactSage die Reaktion der kondensierenden Chromspezies mit den Oxidkomponenten und beschreiben  $\text{CaCrO}_4$  als wichtigen möglichen Cr(VI)-Träger der calciumhaltigen Fasern. Dies ergänzt den Gasphasentransport mechanistisch. Die Studie ersetzt jedoch nicht den unmittelbaren XRD-Phasennachweis aus dem Kontaktversuch von Sayano. Chemisch ist  $\text{CaCrO}_4$  ein Cr(VI)-Chromat;  $\text{CaCr}_2\text{O}_4$  enthält dagegen Cr(III). Abweichende Formelschreibweisen in einzelnen Passagen sind anhand der Oxidationsstufe zu prüfen. [11, 36]

Für die Übertragung auf Anlagen sind die Versuchsbedingungen mitzunehmen: Tatar verwendet stark befeuchtete Luft; van Leeuwen rund 3 Vol.-% Wasser. Beide führen einen gerichteten Gasstrom durch ein Rohr mit heißer Quelle und nachgelagerten Faserproben. Van Leeuwens Versuch läuft bei örtlichem atmosphärischem Druck, nicht in einem Hochdruck-Dampfreaktor. Die Publikation nennt im Abstract 800 °C, im Methodenteil eine Kalibrierung der Ofenmitte auf 850 °C. Die Versuche erklären Reaktionsmöglichkeiten; ihre Mengen sind nicht unmittelbar auf eine frei angeströmte äußere Motorisolierung übertragbar. [35, 36]

### Europäischer Herstellerverband als Auftraggeber: ECFIA und Montana State University

Tatar und van Leeuwen arbeiten innerhalb derselben amerikanischen Forschungsgruppe an der Montana State University; Paul Gannon ist an beiden Publikationen beteiligt. Van Leeuwens Dissertation vom Mai 2024 beschreibt auf Seite 2 ausdrücklich, dass die Forschung auf eine Anfrage von ECFIA als Verband europäischer Hochtemperatur-Dämmwollhersteller zurückging. Untersucht werden sollten Aussagen von Wettbewerbern, deren Produkte die Cr(VI)-Bildung verminderten oder verhinderten. Die Danksagung auf Seite iii nennt eine Teilfinanzierung durch ECFIA-Industriepartner. [35-37]

Damit ist dokumentiert, dass die Cr(VI)-Bildung an Hochtemperatur-Dämmwollen im europäischen Herstellerverband als Thema bekannt war; Anlass waren Wettbewerbsaussagen zur Verminderung oder Verhinderung der Cr(VI)-Bildung. Die Dissertation und die spätere Veröffentlichung sind überlappende Ergebnisse desselben Forschungszusammenhangs, keine voneinander unabhängigen Bestätigungen. Die Finanzierungsangabe bezieht sich hier auf das Dissertationsprojekt; sie wird nicht ohne Weiteres als spezifische Finanzierung jeder einzelnen Publikation ausgegeben. [36, 37]

Daraus folgt eine präzise Frage: Welche Ergebnisse wurden wann an die beteiligten Industriepartner vermittelt, und wie gingen sie in Produktinformationen und anwendungsbezogene Warnungen ein? Das wissenschaftliche Ergebnis ist unabhängig von dieser Kommunikationsfrage anhand seiner Methoden und Daten zu bewerten.

## 15. Asbestzeit, Asbestsubstitution und Chrysotil

### Historische Materialkontinuität: Asbest, Calciumsilikat und die Zeit danach

Calciumsilikat ist nicht erst als nachträglicher Ersatzstoff nach dem Wegfall von Asbest in Hochtemperaturanwendungen eingeführt worden. Die Materialklasse war bereits in der Asbestzeit im Markt der technischen Wärme- und Rohrleitungsdämmung vertreten.

Ein historisches Produktblatt von Johns-Manville dokumentiert diesen Zusammenhang unmittelbar. Es bewirbt „J-M Thermobestos“ für den Einsatz bis 1.200 °F und bezeichnet das Produkt ausdrücklich als „calcium silicate insulation“. Das Blatt steht in einer Produktübersicht des traditionsreichen Asbestherstellers Johns-Manville für Wärme- und Rohrleitungsdämmungen. Es zeigt damit, dass Calciumsilikat in der Asbestzeit keine außerhalb des Asbestmarkts stehende Werkstoffwelt bildete, sondern Teil desselben Hochtemperaturdämmungsumfelds war. [6]

Der spätere Wegfall der Asbestfaser hat die asbestbedingte Fasergefährdung adressiert. Er hat jedoch nicht automatisch die für die Chromatbildung relevante Calciumoxidchemie aus den Dämmstoffsystemen entfernt. Calciumsilikatprodukte wurden weiterhin als Hochtemperaturdämmungen angeboten; gegenwärtig vermarktet Johns Manville beispielsweise ebenfalls calcium-silikatische Hochtemperaturdämmungen, nun ausdrücklich asbestfrei. Die Veränderung der Faserkomponente ist somit nicht mit einer Beseitigung der basischen Calciumkomponente gleichzusetzen.

### Asbest-Mineralwolle-Mischungen und Verbundsysteme

Die historische Materialentwicklung verlief nicht ausschließlich als Wechsel von reinem Asbest zu reiner Mineralwolle. Das Johns-Manville-Patent US2389460A, erteilt am 20. November 1945, beschreibt Wärmedämmplatten mit Steinwolle und Asbestfasern im Gewichtsverhältnis von ungefähr 2:1, verbunden durch einen Kunststoffbinder. Es dokumentiert eine ausdrücklich vorgesehene Fasermischung. [20]

Für die Hochtemperaturtechnik ist zusätzlich US2162387A vom 13. Juni 1939 relevant: Der für Kessel- und Feuerungsfugen beschriebene Hochtemperaturzement enthält 10 Gewichtsprozent Asbestfasern, 5 % Mineralwolle und 8 % Natriumsilikat sowie 27 % Sand und 50 % Feuerclay. Asbest, Mineralwolle und eine Natriumkomponente waren somit bereits damals in derselben Rezeptur vorgesehen. Die historische Bewertung muss solche Misch- und Verbundsysteme einschließlich ihrer basischen Komponenten erfassen. [21]

Die historische und die heutige Risikologik sind daher zu trennen und zugleich zusammenzudenken:

| Zeitlicher und stofflicher Bezug                                       | Relevante Gefährungsdimension                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asbesthaltige Dämmstoffe                                               | Eigenständige, schwerwiegende Faserkanzerogenität und faserbedingte Erkrankungen                     |
| Chrysotilfasern mit Chromgehalt                                        | Potenzielle oxidative Mobilisierung von Cr(VI) als zusätzliche genotoxische Komponente               |
| Calciumsilikatische Hochtemperaturdämmung auf chromlegierten Heißeilen | Calciumbezogener Reaktionspfad zu Calciumchromat                                                     |
| Nach-Asbest-Dämmstoffe mit basischen Oxiden                            | Fortbestehen des Chromatbildungswegs, sofern die erforderlichen Reaktionsbedingungen zusammentreffen |

### Früher Forschungsansatz: der US-Bericht von 1969

Ralph J. Sullivans Air Pollution Aspects of Chromium and its Compounds enthält zwei getrennte Anknüpfungspunkte. Abschnitt 3.4.1 Asbestos, gedruckte Seiten 24-25, referiert damalige Überlegungen zu Chrom und anderen Spurenstoffen als Beteiligte an asbestassoziierten Krebserkrankungen. Er nennt einen Chromgehalt von ungefähr 1.500 µg/g im angeführten Asbestmaterial. Abschnitt 3.4.3 Cement, Seite 25, erläutert die Chromatbildung durch Wärmebehandlung von Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> unter alkalischen Bedingungen und fragt nach deren Bedeutung für weitere Materialien, beispielsweise Asbest. [17]

Der erste Bezug betrifft eine mögliche zusätzliche biologische Schadenskomponente; der zweite eine thermochemische Forschungsfrage. Diese beiden historischen Fragen sind getrennt weiterzuverfolgen: über die faserassoziierte Metallchemie einerseits und über Zusammensetzung, Grenzflächen und Betriebsbedingungen asbesthaltiger Dämmsysteme andererseits. Der Bericht entstand 1969 für die US National Air Pollution Control Administration im Gesundheitsministerium. Er liegt heute im Archiv der US-Umweltbehörde EPA; die EPA war nicht sein damaliger Auftraggeber. [17]

### Chrysotilasbest als mögliche parallele Cr(VI)-Quelle: der Befund von Walter et al.

Die Studie von Walter et al. (2022) untersucht nicht die Chromatbildung an Dämmstoffen, sondern die Freisetzung von Chrom aus Chrysotilasbest. Gerade deshalb ergänzt sie die historische Betrachtung entscheidend: Sie macht sichtbar, dass eine Asbestexposition bei chromhaltigem Chrysotil nicht zwingend ausschließlich als Faserexposition verstanden werden kann.

Walter et al. zeigen im untersuchten Chrysotil einen Chromgehalt im niedrigen Gramm-pro-Kilogramm-Bereich. Das Chrom liegt im Ausgangszustand überwiegend als schwer lösliches Cr(III) vor. Unter oxidativen Bedingungen bei physiologischem pH, insbesondere in Gegenwart von Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), wurde Chrom aus den Fasern mobilisiert und in der Lösung ausschließlich als Cr(VI) nachgewiesen. Das mobilisierte Cr(VI) lag überwiegend als Chromat-Oxyanion vor.

### Der zuvor unzureichend untersuchte Chrompfad

Walter et al. stellen klar, dass eine Beteiligung von Chrom an der Kanzerogenität von Chrysotil bereits früher postuliert worden war. Unzureichend verstanden waren jedoch das Verhalten und die Reaktivität des faserassoziierten Chroms in Lunge und Pleura; die Aufnahmefähigkeit einschlägiger Zellen war nach Kenntnis der Autoren zuvor nicht untersucht worden. Die Studie adressiert diese Wissenslücken experimentell. [4]

Die Studie belegt darüber hinaus, dass Lungenepithel-, Mesothel-, Lungenkarzinom- und Mesotheliomzellen Cr(VI)-Transporter exprimieren und das in den Zellaufnahmeversuchen dem Kulturmedium zugesetzte Cr(VI) aufnehmen. Die intrazelluläre Chromanreicherung erreichte in den Versuchen bis etwa das Zehnfache der Konzentration im umgebenden Medium. Nach Auffassung der Autoren kann dieses mobilisierte und zellgängige Cr(VI) deshalb zur Tumorentstehung und Tumorentwicklung bei asbestassoziierten Erkrankungen beitragen.

Der Befund muss präzise gelesen werden:

- Er schwächt die eigenständige Kanzerogenität der Asbestfaser nicht ab.
- Er verlagert die bekannte Eisen-/Faserchemie nicht auf Chrom. Walter et al. fanden keinen relevanten Beitrag des Chroms zur H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Zersetzung oder zur Hydroxylradikalbildung; dieser Pfad blieb im Wesentlichen dem Eisen zugeordnet.
- Er ergänzt die Schadensmechanismen um einen zusätzlichen, Cr(VI)-vermittelten genotoxischen Pfad.

Damit eröffnet die Studie eine historisch relevante Frage: In welchem Umfang wurden Erkrankungsrisiken bei chrysotilhaltigen Expositionen ausschließlich der Faserwirkung zugerechnet, obwohl aus den Fasern unter entzündlich-oxidativen Bedingungen zusätzlich Cr(VI) mobilisiert worden sein könnte? Walter et al. beantworten diese Frage nicht quantitativ. Sie zeigen jedoch, dass eine parallele Cr(VI)-Beteiligung wissenschaftlich begründet in die Bewertung einzubeziehen ist.

### Asbestsubstitution: Beseitigung der Fasergefährdung, nicht zwingend des gesamten Reaktionssystems

Der historische Übergang von asbesthaltigen zu asbestfreien Hochtemperaturdämmungen war zunächst und zu Recht eine Substitution der Asbestfaser. Die Asbestfaser war wegen ihrer eigenständigen, schwerwiegenden kanzerogenen Wirkung nicht mehr haltbar. Ihre Entfernung aus Dämmstoffen war deshalb zwingend.

Diese Fasersubstitution ist jedoch nicht mit einer vollständigen stofflichen Substitution des gesamten Hochtemperatur-Dämmsystems gleichzusetzen. Historisch wurden Asbestfasern in Dämmstoffsystemen mit anorganischen Komponenten kombiniert. Die USGS führt für lose Asbestfasermischungen ausdrücklich unter anderem hydriertes Calciumsilikat als anorganische Mischungskomponente für Wärme-, Elektro- und Schalldämmprodukte auf. [8] Bereits das US-Patent 668,684 aus dem Jahr 1901 beschreibt zudem einen feuerhemmenden Dämmstoffverbund aus äußeren Lagen von Asbestpapier und einer mineralwollenen Kernschicht. [7]

Mit dem Wegfall des Asbests änderte sich damit in vielen Anwendungen primär die kritische Faserkomponente. Soweit die asbestfreien Nachfolgeprodukte weiterhin Calcium-, Natrium-, Magnesium- oder Kaliumoxide aus Fasern, Füllstoffen, Bindern oder sonstigen Rohstoffen enthielten, blieb die basisch-oxidische Chemie der Dämmung erhalten. Auf chromlegierten Heißeilen blieben damit auch die stofflichen Voraussetzungen für die Bildung von Chrom(VI)-Verbindungen bestehen.

Die fachlich präzise Bewertung lautet deshalb:

Die Asbestsubstitution beseitigte die nicht mehr vertretbare Asbestfaser, nicht aber zwangsläufig den von dieser unabhängigen Reaktionspfad aus Chromquelle, basischen Oxiden, Sauerstoff und thermischer Beanspruchung zu Calcium- und/oder Natriumchromat.

„Asbestfrei“ ist daher keine Aussage darüber, ob ein Hochtemperaturdämmstoff auf chromlegierten Heißeilen chemisch inert ist oder kein Chromatbildungsrisiko besitzt. Eine präventiv vollständige Substitution muss beide Gefährdungsdimensionen erfassen: Sie muss die asbestbedingte Fasergefährdung ausschließen und bei der vorgesehenen Anwendung den Bildungsweg zu Chrom(VI)-Verbindungen vermeiden. Dies setzt voraus, dass die Dämmung keine chromatbildenden basischen Oxide enthält oder deren Reaktionsverfügbarkeit unter den Einsatzbedingungen sicher ausgeschlossen ist.

## 16. Hersteller- und Betreiberwarnungen: dokumentierter industrieller Wissensstand

Die wissenschaftlichen Arbeiten stehen nicht isoliert. Hersteller von Motoren, Aggregaten, Dämmstoffen und Mineralwolle haben die Problematik in technischen Informationen, Service-Mitteilungen und Sicherheitshinweisen aufgegriffen. Diese Dokumente zeigen, dass der Entstehungspfad in verschiedenen industriellen Anwendungsfeldern praktisch beobachtet, analytisch bestätigt und teilweise mit konkreten Präventionsvorgaben verbunden wurde. Diese Meldungen sind keine vorsorglichen Hinweise. Sie beschreiben Funde an Anlagen im Betrieb, teilweise mit Abbildungen aus dem Feld.

### Die früheste Meldung: Babcock & Wilcox 1990 und 1994

Die erste dokumentierte Herstellerwarnung zu diesem Bildungsweg stammt nicht aus den letzten Jahren. Die Babcock & Wilcox Power Generation Group gab im April 1990 das Plant Service Bulletin PSB-43 an Eigentümer und Betreiber von Kesseln und Dampferzeugern heraus. Die Erstfassung betraf chromhaltiges Feuerfestmaterial. Die überarbeitete Fassung PSB-43A von März 1994 erweitert den Anwendungsbereich ausdrücklich auf „plastics, insulation, and textiles“. [75]

Die Mitteilung beschreibt den Vorgang unmissverständlich: Materialien, die in Kesseln eingesetzt werden, können Chromverbindungen „as part of the mixture or composition“ enthalten, und „during operation, some of the chromium compounds may be converted to hexavalent chromium“. Beim Ausbau gilt: „the dust created may transport the hexavalent chromium. Inhaling hexavalent chromium increases the risk of lung cancer in humans“. [75]

Die empfohlenen Maßnahmen entsprechen in der Sache dem Schutzregime, das die deutsche TRGS 561 heute unter 4.1 und 4.2 vorsieht: Schulung, Ausrüstung und Überwachung des Personals, staubarmes Arbeiten, kein Hautkontakt, Entsorgung als gefährlicher Abfall, in der Mitteilung nach 40 CFR 261 und 262. Der Unterschied liegt im Auslöser. Die deutsche TRGS 561 geht in 3.3.4 und 5.9.3 davon aus, dass die Bildung von Chrom(VI)-Verbindungen an chromlegierten Heißeilen nicht auszuschließen ist, und verlangt deshalb das Schutzregime samt Substitutionsprüfung ohne vorherige Messung. Das Bulletin von 1990 setzt stattdessen eine Untersuchung an den Anfang und empfiehlt, vor dem Ausbau durch ein qualifiziertes unabhängiges Labor prüfen zu lassen, ob Chromverbindungen vorhanden sind und ob sie sich in Chrom(VI) umgewandelt haben. Zum Ersatz heißt es dort, Substitute für chromhaltige Produkte seien verfügbar, hätten aber teilweise eine kürzere Standzeit. [75]

Die Mitteilung nennt die betroffenen Produkte namentlich. Unter den Feuerfestmaterialien und Stampfmassen stehen unter anderem Chrome Ore, Chrome Mortar, Kromight, Kromecast, Monochrome und Moldit Chrome Castable. Als chromhaltige Dämm- und Textilprodukte werden Cerachrome, Z-Blok, Ceraform 130 und Cerachrome Felt aufgeführt. [75]

### Was daraus gefolgt wurde

Der gezogene Schluss war naheliegend: Das Produkt enthielt Chrom, also wurden chromhaltige Produkte ausgewählt. Die Rezepturen selbst blieben unverändert; das Sicherheitsdatenblatt für Ceraform 130 weist in der Fassung vom 23. Dezember 2020 weiterhin Chrom(III)-oxid mit bis zu 3 Prozent aus (Abschnitt 3). Das gelbe Pulver trat weiterhin auf. Da das Chrom aus der Dämmung entfernt schien, blieb als Erklärung das chromlegierte Heißeil, und damit galt der Befund als unvermeidbar. [77]

Nicht erkannt wurde ein zweites Mal, um welche Verbindungen es sich handelte. Es waren Alkali- und Erdalkalichromate, und deren Reaktionspartner war nie entfernt worden. Er steckt bis heute in denselben Produkten, hinter einer CAS-Nummer, die kein Anwender nachschlägt. Heutige Ersatzlösungen haben dieses Problem nicht mehr: Es stehen (erd-)alkalimetalloxidfreie Hochtemperaturdämmstoffe zur Verfügung, die den Bildungsweg vermeiden, ohne Einbußen bei Temperaturbeständigkeit und Standzeit.

| Herausgeber                                                                         | Dokumentierter Befund                                                                                                                                                                          | Aussage zur Entstehung und Prävention                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caterpillar /<br>Caterpillar Energy<br>Solutions                                    | Gelbe Rückstände an Abgassystemen und Abgasisolierungen; unabhängige Laboruntersuchungen bestätigten Cr(VI).                                                                                   | Hinweise auf hohe Temperaturen, Ersatzteile, Wartungsmaterialien und Betriebsumgebungen. Bei auffälligen Rückständen: Staubvermeidung, PSA und gefährliche Abfallbehandlung.                                       |
|  |  , freigegeben am 31.05.2023: Cr(VI) als gelblicher Rückstand auf Motorenteilen oder Dämmung.               | Nennt chromhaltigen Stahl, Calcium etwa aus Dämmmaterial, Sauerstoff und Temperaturen über 400 °C. Adressatenkreis umfasst Kunden, Servicepartner und Niederlassungen. [25]                                        |
| MAN Truck & Bus SE                                                                  | Eigene Analysen wiesen Cr(VI) an gelaufenen Motorenkomponenten nach; Calciumchromat $\text{CaCrO}_4$ ausdrücklich benannt.                                                                     | Cr-haltige Stähle, calciumhaltige Isolierstoffe oder Montagepasten, Sauerstoff, Temperaturen über 300 °C. Für Montagearbeiten ausschließlich geeignete calciumfreie Pasten.                                        |
| Frenzelit                                                                           | Bestätigt Calciumoxidanteile eigener Isolationsmaterialien in unterschiedlichen Anteilen.                                                                                                      | Cr-legierter Stahl, Alkali-/Erdalkalioxide, besonders $\text{CaO}$ , Sauerstoff, über 350 °C. Eigene Produkte können bei Vorliegen der Bedingungen zur Cr(VI)-Bildung beitragen.                                   |
| Rockwool Technical<br>Insulation                                                    | 95-100 % Steinwolle; zusammen mehr als 18 % Alkali-/Erdalkalioxidanteile. Cr(VI)-Ablagerungen auf Edelstahl und Mineralwolle beschrieben.                                                      | Erörtert Ablagerungen bei heißem Edelstahl Draht. Bei auffälligen Ablagerungen Schnelltest; bei Cr(VI) spezifische Arbeitsschutz-/Hygienevorgaben. Beim Ausbau auffälliger Ablagerungen ebenfalls Schutzmaßnahmen. |
|  | Service Information  vom 07.08.2025: Cr(VI)-Bildung auf Oberflächen heißer, chromhaltiger Abgaskomponenten. | Nennt unter anderem Turbolader, Abgaskrümmen, EGR, Katalysatoren und DPF; verlangt Schutzmaßnahmen, untersagt Druckluftreinigung und beschreibt Neutralisierung. [22]                                              |

| Herausgeber                                                                       | Dokumentierter Befund                                                                                                                                                                                       | Aussage zur Entstehung und Prävention                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  vom 27.08.2025:<br>bestätigte Cr(VI)-Kontaminationen<br>unter anderem an Hitzeschilden,<br>Abgaskrümmern und Turboladern. | Warnung ausdrücklich für Personal im Motorraum,<br>Fahrzeugreparaturen und<br>Komponentenhandhabung; Kontamination kann<br>unsichtbar sein. Vorgaben zu PSA, Hygiene und<br>Reinigung. [23] |

### Was diese Warnmeldungen belegen

Die Warnmeldungen betreffen mehrere industrielle Anwendungsfelder. MAN benennt Calciumchromat und die materialbedingten Bildungsbedingungen; Frenzelit ordnet eigene Calciumoxidanteile in denselben Zusammenhang ein. Caterpillar bestätigt reale Cr(VI)-Funde. Rockwool beschreibt Ablagerungen und die basische Oxidzusammensetzung seiner Steinwolle. [12-16]

Einzelne Dokumente erklären die Entstehung noch als „nicht vollständig“ oder „im Allgemeinen noch nicht nachvollziehbar“ und verweisen auf mögliche externe Quellen wie Ersatzteile, Wartungsmaterialien oder Betriebsumgebungen. Diese Aussagen können offene Fragen zu lokalen Quellenanteilen, Kinetik oder konkreten Betriebsbedingungen betreffen. Sie stellen jedoch den dokumentierten Bildungsweg nicht in Frage. Gerade Ersatzteile, Montagepasten und Dämmstoffe sind mögliche Träger der für die Chromatbildung relevanten Calcium- und Natriumverbindungen.

Die Darstellung der Exposition als vereinzelter, nicht erklärbares oder ausschließlich durch externe Sonderumstände verursachtes Problem lässt daher den publizierten wissenschaftlichen, herstellerseitigen und berufsgenossenschaftlichen Wissensstand unberücksichtigt. Ob eine solche Ausblendung bewusst oder unbewusst erfolgt, ist aus den Dokumenten selbst nicht ableitbar; fachlich bewirkt sie jedoch eine Relativierung eines bekannten und vermeidbaren Reaktionspfades.

### Wo der Hinweis steht: die Sicherheitsdatenblätter der Feuerfestprodukte

HarbisonWalker International ist Rechtsnachfolger von Harbison-Walker, A.P. Green und NARCO, also der Hersteller, deren Produkte das Bulletin von 1994 namentlich aufführt. Auf den Sicherheitsdatenblättern seiner chromhaltigen Feuerfestprodukte steht der Satz: „The chrome compounds (Cr III) in this product may be altered to a hexavalent compound (Cr VI) under certain use conditions, such as exposure to alkali salts and/or high temperatures.“ Geprüft wurde er an PLASTECH RUBY (Version 02 vom 1. April 2021), AUREX 30 SR (Version 02 vom 29. Juni 2018), SFG (Version 02 vom 22. März 2021) und RUBY (Version 03 vom 17. April 2020). [93]

Der Satz steht in Abschnitt 13, Entsorgung. In den geprüften Blättern kommt das Wort hexavalent an keiner anderen Stelle vor, weder in Abschnitt 2 noch in Abschnitt 10. Nach Anhang D zu OSHA 29 CFR 1910.1200 verlangt Abschnitt 10 die Angabe der „Possibility of hazardous reactions, including those associated with foreseeable emergencies“ und der „Hazardous decomposition products“, Abschnitt 7 die „Precautions for safe handling“; die Abschnitte 12 bis 15 führt die Tabelle D.1 als nicht verbindlich. Die Aussage über die Umwandlung steht damit in dem Teil des Blattes, für den keine inhaltliche Prüfpflicht besteht. Gelesen wird dieser Teil von demjenigen, der über die Abfalleinstufung entscheidet, und zwar nach dem Ausbau. [94]

Die Zusammensetzungen zeigen, dass der alkalische Partner in mehreren dieser Produkte enthalten ist. SFG, ein Magnesia-Chrom-Stein, führt Magnesiumoxid mit 70 bis 90 Prozent neben Chrom(III)-oxid mit 20 bis 40 Prozent. RUBY führt Natriumaluminat mit 2,5 bis 10 Prozent neben Chrom(III)-oxid mit 2,5 bis 10 Prozent. THERMOLITH, ein Chrommörtel mit 80 bis 100 Prozent Chromverbindungen und 2,5 bis 10 Prozent Natriumsilikat als Bindemittel, enthält den Hinweis nicht. Der Hersteller formuliert das Alkali als etwas, dem das Produkt von außen ausgesetzt wird, während es in mehreren seiner eigenen Produkte Bestandteil ist. [93]

Auf der Faserseite fehlen der Hinweis und der Partner. Das Sicherheitsdatenblatt Morgan SDS 252 in der Revision vom 1. Juni 2015 deckt Cerachrome und Z-Blok in der CR-Ausführung ab und führt die Refractories, Fibers, Aluminosilicate unter CAS 142844-00-6 mit 95 bis 100 Prozent sowie Chrom(III)-oxid mit bis zu 3 Prozent; Abschnitt 10 nennt als Zersetzungsprodukte „None“, und Chrom(VI) kommt im ganzen Blatt nicht vor. In keinem der geprüften Faserblätter erscheint Calcium als eigene Zeile, auch nicht im Blatt zu Ceraform 130. Der Reaktionspartner steckt in der Stoffdefinition hinter der CAS-Nummer: Das Registrierungsdossier der ECHA beschreibt die Stoffgruppe als amorphe Glasfaser aus Siliciumdioxid und Aluminiumoxid mit einer Reihe weiterer Oxide, darunter ausdrücklich Calciumoxid, und die Definition der Stoffklasse lässt einen Gehalt an Alkali- und Erdalkalioxiden von bis zu 18 Gewichtsprozent zu. [95, 96]

Für dieselbe Reaktion bestehen damit zwei Darstellungen. Die Feuerfesthersteller benennen den Umwandlungsweg und seine Bedingungen und setzen die Aussage in die Entsorgungsrubrik. Auf der Faserseite wird der Weg nicht benannt, und der Reaktionspartner erscheint in den Blättern nicht als Bestandteil.

### Sicherheitsinformationen: Lieferzustand und Gebrauchszustand

Rockwools europäische ProRox-WM-S/SW-Anweisung enthält bereits am 1. Mai 2023 und weiterhin in Version 1.1 vom 1. Januar 2025 ausdrückliche Hinweise auf Cr(VI)-Ablagerungen nach Hochtemperatureinsatz, deren Krebsgefahr und Schutzmaßnahmen beim Ausbau. Die europäische Anweisung bezieht sich speziell auf Ausführungen mit Edelstahlgitter und/oder Edelstahlnähdraht. [16, 24]

Bei Morgan behandeln die Abschnitte zur Reaktivität vor allem die Stabilität der AES-Fasern, Bindemittelzersetzung und Hochtemperatur-Phasenänderungen. Auch nach Einsatz werden Faserbeziehungsweise Silicastaubfragen angesprochen; der Reaktionspfad mit chromhaltigen Gegenflächen wird im geprüften britischen SDS 418 nicht erläutert. Aspen beschreibt in der deutschen Artikelinformation zu Pyrogel XTE keine bekannten gefährlichen Reaktionen bei üblicher Verwendung, erwähnt aber keinen Chromatpfad. Das ist eine konkrete Dokumentationslücke für die weitere Prüfung geeigneter Materialkombinationen. Es ist kein Befund über sämtliche Unterlagen dieser Hersteller. [28, 29]

Für die Bewertung ist der Lieferzustand von der vorgesehenen thermischen Anwendung und vom Ausbauzustand zu unterscheiden. Eine nicht gefährlich eingestufte Faser oder ein als Artikel behandeltes Produkt kann nach Gebrauch mit neu gebildeten Gefahrstoffen belastet sein. Entscheidend ist, ob die Sicherheitsinformation diesen Zustandswechsel für den vorgesehenen Kontakt mit chromhaltigen Bauteilen abdeckt.

### Herstellerkenntnis seit 2019: [REDACTED]

Dem Verfasser liegt Herstellerkorrespondenz von [REDACTED] aus dem August 2019 vor. Darin teilte der Hersteller seinem Lieferanten von Abgasisolierungen mit, dass Ablagerungen zwischen Abgasisolierung und Abgasleitungen an [REDACTED]-Motoren positiv auf Chrom(VI) getestet worden seien. Das Thema sei als besonders besorgniserregender Stoff (SVHC) mit höchster Dringlichkeit zu behandeln. Als Ursache benannte der Hersteller schon damals den Chrom enthaltenden Edelstahl, insbesondere das Drahtgeflecht der Isolierung, in Reaktion mit Calcium aus dem Isoliermaterial. Ergänzend wurde mitgeteilt, dass das Problem bei allen Motortypen auftrete. [52]

Damit war der calciumabhängige Bildungsweg dem Hersteller knapp vier Jahre vor der Technischen Anweisung [REDACTED] (2023) bekannt. Er entspricht dem Mechanismus, den Udy 1939, Paoletti 2002 und Sayano 2015 beschreiben. [1, 11, 25, 50]

## 17. Analytik: Die Methode entscheidet über den Befund

Die Bestimmung von Chrom(VI) ist keine Elementbestimmung, sondern eine Speziesanalytik. Gemessen wird ein Oxidationszustand, und dieser Zustand kann sich während der Probenvorbereitung ändern. Was das Gerät am Ende registriert, ist nicht zwingend das, was in der Probe vorlag.

Das amerikanische Verfahren EPA SW-846 Method 3060A, das dem alkalischen Aufschluss zugrunde liegt, benennt beide Fehlerrichtungen ausdrücklich. Zum einen dürfen die Extraktionsbedingungen „not induce reduction of native Cr(VI) to Cr(III)“, zum anderen darf die Methode „not cause oxidation of native Cr(III) contained in the sample to Cr(VI)“. Zur zweiten Richtung heißt es weiter: „Cr(VI) results obtained using this method may be biased high due to method-induced oxidation.“ [83]

### Die Reduktion während des Aufschlusses

Enthält die Probe reduzierende Bestandteile, wird das Chromat umgesetzt, bevor es gemessen werden kann. In Beschichtungen sind das vor allem metallisches Zink und Aluminium, daneben Eisen(II) und organische Bestandteile. Der Ringversuch zur niederländischen NEN 5617 zeigt die Größenordnung: Bei einer zinkfreien Farbprobe erreichten die teilnehmenden Laboratorien im Mittel 58 Prozent Wiederfindung, bei 50.000 mg/kg Zink noch 39 Prozent. In einer Matrix mit 16 Prozent Zink lag die Wiederfindung nach NEN 5617 bei 0,2 Prozent, bei einem weiteren akkreditierten Verfahren bei 6,5 Prozent und bei dem Verfahren von SEEF B.V. bei 35,3 Prozent. Die NEN 5617:2022 stuft sich aus diesem Grund selbst als semiquantitativ ein. [84, 85]

### Die Dämmstoffmatrix

Für thermische Dämmstoffe verschärft sich die Lage, weil die Matrix selbst der Reaktionspartner ist: calciumreich, basisch und in gebrauchtem Zustand mit Ruß, Öl und Korrosionsprodukten durchsetzt. Eine genormte Methode für diese Matrix existiert nicht; es gibt weder eine NEN- noch eine ISO- noch eine NIOSH-Methode, die auf Dämmstoffe zugeschnitten ist. Die ISO 15192:2021 ist für Abfall und Boden bestimmt. Übertragene Verfahren liefern nach den Angaben des damit befassten Labors Unterbefunde von 20 bis 30 Prozent in milden Fällen und Werte nahe null bei stark calciumhaltigen Proben. Ein niederländisches Labor, SEEF B.V., hat für diese Matrix ein eigenes Verfahren entwickelt, das Chrom(VI) über den gesamten Analysengang stabilisiert und nach eigenen Angaben an dotierten Dämmstoffproben Wiederfindungen von strukturell über 80 Prozent erreicht. [85]

### Ölfilme und apolare Phasen

Neben der Reduktion gibt es einen zweiten Weg, auf dem eine Probe zu wenig anzeigt. Wird eine Oberfläche vor der Probenahme mit einem Kriechöl behandelt, geht das Chromat in eine apolare Phase über und steht der wässrigen Messung nicht mehr zur Verfügung. Chemisch geschieht dabei nichts; der Analyt ist der Bestimmung nur entzogen.

SEEF B.V. hat das für WD-40 quantifiziert. Festes Chrom(VI) in direktem Kontakt mit 2 ml WD-40, anschließend ohne Aufschlusschemie in Wasser gelöst, ergab eine Wiederfindung von 5,8 Prozent. Bei höheren Volumina war keine verlässliche Konzentration mehr zu ermitteln, weil das Chromat in der Ölphase verklumpte. Bei bereits gelöstem Chrom(VI) und bei vollständigem Aufschluss trat der Effekt nicht auf (Abschnitt 26). [91]

Für die Praxis folgt daraus, dass eine Probenahme nach einer Öl- oder Fettbehandlung keinen verwertbaren Befund liefert. Das betrifft Kriechöle ebenso wie Montagepasten und Konservierungsmittel.

### Was daraus für die Gefährdungsbeurteilung folgt

Ein Analysenergebnis zu Chrom(VI) ist ohne Angabe der Wiederfindung an derselben Matrix keine Aussage über den Gehalt. Die EPA-Methode zieht daraus die Konsequenz und verlangt dotierte Proben vor dem Aufschluss, löslich und unlöslich, mit einem Annahmehereich der Wiederfindung von 75 bis 125 Prozent; außerhalb dieses Bereichs ist die gesamte Serie zu wiederholen. [83]

Fehlt diese Angabe, sind zwei falsche Schlüsse möglich. Ein zu niedriger Befund führt dazu, dass eine vorhandene Belastung als unerheblich eingestuft wird und Schutzmaßnahmen unterbleiben. Ein methodisch erhöhter Befund führt dazu, dass Maßnahmen an der falschen Stelle ansetzen. Für den Arbeitsschutz wiegt der erste Fall schwerer, weil er zu einer Freigabe führen kann, der keine tatsächliche Freiheit von Chromat zugrunde liegt.

Dies ist keine Bewertung einzelner Laboratorien. Die genannten Verfahren sind für die Matrices, für die sie entwickelt wurden, geeignet und werden fachgerecht ausgeführt. Der Punkt ist ein anderer: Chrom(VI) ist matrixabhängig, und ein Verfahren, das für Boden oder Abfall entwickelt wurde, liefert an einem gebrauchten, calciumreichen Dämmstoff keinen vergleichbaren Befund.

Daraus ergibt sich die Anforderung an jeden Prüfbericht: Methode, Matrix und Wiederfindung an dieser Matrix gehören in den Bericht, nicht nur der Zahlenwert. Und daraus ergibt sich zugleich, warum die deutsche TRGS 561 nicht auf eine Messung abstellt, sondern auf die Vermutung der Anwesenheit: Solange die Wiederfindung in dieser Matrix nicht belegt ist, ist ein Nullbefund kein Nachweis der Abwesenheit.

### 18. Regelwerke im Vergleich: ein Maßstab, fünf Ausprägungen

Für alle Mitgliedstaaten gilt übergeordnet die Richtlinie 2004/37/EG in ihrer geltenden Fassung. Sie setzt seit dem 17. Januar 2025 einen verbindlichen Grenzwert von 0,005 mg/m<sup>3</sup> für Chrom(VI)-Verbindungen; davor galten 0,010 mg/m<sup>3</sup> und beim Schweißen und Plasmaschneiden 0,025 mg/m<sup>3</sup>. [86]

Den Maßstab für die hier behandelte Fragestellung setzt Deutschland. Die GefStoffV und die TRGS 561 sind das einzige dieser Regelwerke, das die Entstehung von Chrom(VI)-Verbindungen an chromlegierten Heißeilen ausdrücklich behandelt und daraus ein Schutzregime ableitet, ohne eine vorherige Messung zu verlangen. Für Chrom(VI)-Verbindungen besteht keine Akzeptanzkonzentration; die TRGS 561 zieht 0,001 mg/m<sup>3</sup> in der einatembaren Fraktion als Beurteilungsmaßstab heran, der zugleich der Toleranzkonzentration der TRGS 910 entspricht. [87]

Die übrigen Regelwerke lassen sich als Spiegel dazu lesen.

| Rahmen                 | Grundlage                                      | Luftgrenzwert                                                |
|------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Niederlande            | Arbobesluit, SZW-Liste krebserzeugender Stoffe | 0,001 mg/m <sup>3</sup> als Cr                               |
| Vereinigtes Königreich | COSHH Regulations 2002, EH40                   | 0,05 mg/m <sup>3</sup> , 8-Stunden-Mittelwert [88]           |
| Vereinigte Staaten     | OSHA 29 CFR 1910.1026                          | PEL 5 µg/m <sup>3</sup> , Action Level 2,5 µg/m <sup>3</sup> |

Die Zahlenwerte liegen um den Faktor 50 auseinander. Alle beziehen sich auf den Chromgehalt, keiner auf die konkrete Verbindung. Der Abstand ist allerdings kleiner, als er aussieht: Das Vereinigte Königreich hat zwar den höchsten Wert, verlangt aber für krebserzeugende Stoffe nach den COSHH Regulations zugleich die Minimierung auf das vernünftigerweise praktikable Mindestmaß, sodass der Grenzwert dort keine zulässige Arbeitshöhe beschreibt.

Die Luftkonzentration beschreibt dabei nur einen von zwei Expositionspfaden. Chrom(VI)-haltige Stäube verteilen sich im Arbeitsbereich nicht gleichmäßig, und bei Arbeiten an gedämmten Heißeilen kann die dermale Exposition höher zu bewerten sein als die inhalative. Beide Pfade sind getrennt zu beurteilen. Die amerikanische Regel schreibt Schutzkleidung, Umkleide- und Waschbereiche sowie das Verbot des Abblasens mit Druckluft vor; das deutsche Regelwerk führt Chrom(VI)-Verbindungen als hautresorptiv und verlangt entsprechende Maßnahmen nach der TRGS 401.

Bei Verbrennungssachen gilt dasselbe. Auch dort sind inhalative und dermale Gefährdung getrennt zu bewerten, und besonderes Gewicht hat die Verhinderung der Verschleppung aus dem kontaminierten Bereich, die Arbeitsschutz und Umweltschutz zugleich betrifft.

### Beschaffungsrecht: die US-Klausel DFARS 252.223-7008

Neben dem Arbeitsschutz greift in den Vereinigten Staaten das Beschaffungsrecht. Die Klausel DFARS 252.223-7008 „Prohibition of Hexavalent Chromium“ gilt seit dem 5. Mai 2011 und wird nach DFARS 223.7306 in Verträge des Verteidigungsministeriums aufgenommen; die letzte Änderung datiert vom 25. April 2024. Grundlage ist das Memorandum „Minimizing the Use of Hexavalent Chromium“ des Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics vom 8. April 2009. [89, 90]

Untersagt ist die Lieferung eines Gegenstands oder Bauprodukts, das Chrom(VI) „in a concentration greater than 0.1 percent by weight in any homogenous material“ enthält, ebenso die Lieferung von Gegenständen, bei denen Chrom(VI) in späteren Erhaltungsphasen entfernt oder neu aufgetragen werden müsste. Als homogenes Material gilt nach der Begriffsbestimmung in Absatz (a) ein Material, das sich nicht mechanisch zerlegen lässt und durchgehend gleichmäßig zusammengesetzt ist; Oberflächenbeschichtungen zählen ausdrücklich als eigenes homogenes Material. Die Ausnahme in Absatz (b)(2) erfasst „hexavalent chromium produced as a by-product of manufacturing processes“. Absatz (d) verpflichtet zur Weitergabe an alle Unterauftragnehmer für Lieferungen, Wartungs- und Reparaturleistungen oder Bauprodukte. [89]

Für gedämmte Heißeile ergeben sich daraus drei Punkte. Die Bezugsmasse der 0,1 Prozent ist das homogene Material, sodass eine dünne chromathaltige Ablagerungs- oder Beschichtungsschicht gegen die Masse dieser Schicht gerechnet wird und nicht gegen die des Bauteils. Die Ausnahme ist auf Herstellungsprozesse formuliert und erfasst nach ihrem Wortlaut kein Chromat, das erst im Betrieb entsteht. Die Weitergabepflicht erstreckt die Klausel auf Wartungs- und Reparaturleistungen. Ob eine calciumhaltige Dämmung auf einem chromlegierten Heißeil, die bei jeder Revision die Entfernung von Chromat erfordert, unter die zweite Verbotsvariante fällt, ist eine Auslegungsfrage, die der Wortlaut zulässt.

## 19. Schnelltest-Philosophie und die französische Feldstudie

---

Die technischen Informationen von Caterpillar, MAN und insbesondere Rockwool folgen teilweise einer abgestuften Erkennungs- und Reaktionslogik:

1. Zunächst wird nach sichtbaren gelben, gelblichen oder orangenen Ablagerungen gesucht.
2. Bei einem solchen sichtbaren Anlass wird ein kolorimetrischer Schnelltest eingesetzt oder eine Laboruntersuchung empfohlen.

3. Besondere Schutzmaßnahmen werden anschließend an den positiven Nachweis oder an den konkreten Verdacht gekoppelt.

Diese Vorgehensweise hat einen nachvollziehbaren Zweck als orientierendes Warn- und Screeningverfahren. Ein positives Ergebnis ist ein belastbares Warnsignal und erfordert Schutzmaßnahmen. Sie ist jedoch nicht geeignet, aus einem negativen Ergebnis auf die Abwesenheit einer Cr(VI)-Kontamination zu schließen.

In der ProRox-Anweisung ist die Prüfung auf Cr(VI) an auffällig gefärbte Ablagerungen gekoppelt. Daneben verlangt sie beim Ausbau solcher Ablagerungen Schutzmaßnahmen. Die visuelle Erkennungslogik erfasst jedoch nicht zuverlässig jede Kontamination und darf nicht als Entlastung bei fehlender Farbe oder negativem Schnelltest verstanden werden.

Das ist als Freigabe- oder Entlastungslogik fachlich nicht tragfähig. Die Materialkonstellation aus chromlegiertem Heißeil, basischen Oxiden, Sauerstoff und Temperatur begründet bereits eine konkrete Verdachtslage. Ein negativer Schnelltest reduziert diese Verdachtslage nicht auf null, weil seine Nachweisempfindlichkeit, die repräsentative Probenahme, die Oberflächenheterogenität und die getestete Stelle begrenzt sind. Auch die nachträgliche chemische Behandlung oder „Neutralisierung“ bereits vorhandener Rückstände ersetzt weder die Prävention des Entstehungspaths noch einen belastbaren Wirksamkeitsnachweis unter kontrollierten Bedingungen.

#### Präventionsmaßstab der deutschen TRGS 561

Abschnitt 5.9.3 der deutschen TRGS 561 nennt Alkali-/Erdalkalimetalloxide aus Dämmstoffen oder Montagepasten als Einflussfaktor. Absatz 5 verlangt Schutzmaßnahmen nach 4.1 und 4.2 sowie ergänzende Maßnahmen, wenn eine Chrom(VI)-Belastung vorliegt oder nicht auszuschließen ist. Basische Oxidanteile sind im thermisch beanspruchten Materialsystem deshalb ein Gefährdungshinweis; der Schutzansatz setzt nicht erst bei einem positiven Befund ein. [19]

Die folgende französische Feldstudie zeigt die praktische Konsequenz dieser Schnelltest-Philosophie unmittelbar.

#### Die französische Feldstudie: warum negative Schnelltests keine Entwarnung erlauben

Die französische Untersuchung von Passeron et al. (2025) bei der Wartung von Diesel- und Schiffsmotoren zeigt eine weitere, praktisch bedeutsame Ebene: Die Chrom(VI)-Kontamination kann mit visuellen kolorimetrischen Schnelltests übersehen werden.

Das Unternehmen setzte intern kolorimetrische Tests ein und verband daran präventive Entscheidungen. Die Studienautoren verglichen diese Tests auf denselben Entnahmestellen mit Oberflächenwischproben, die mittels Ionenchromatographie auf Cr(VI) untersucht wurden. Das Ergebnis war eindeutig:

| Entnahmestelle am Fahrzeugmotor | Laboranalytischer Cr(VI)-Befund | Visueller kolorimetrischer Schnelltest |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
| Abgaskrümmer                    | 127 ng                          | Allenfalls schwach wahrnehmbar positiv |
| Turbolader                      | 869 ng                          | Negativ                                |
| Schraube am Turboladerausgang   | 1.646 ng                        | Positiv                                |

Die Werte sind absolute Cr(VI)-Mengen je Probe, keine flächenbezogenen Konzentrationen.

Der negative Schnelltest am Turbolader trotz eines Laborbefunds von 869 ng Cr(VI) ist ein klarer falsch-negativer Befund. Die Autoren halten außerdem fest, dass mehrere positive Oberflächenproben durch visuelle kolorimetrische Tests nicht erfasst wurden. Sie folgern deshalb ausdrücklich, dass diese Tests mit Vorsicht einzusetzen sind.

Für die belastbare Bewertung der Oberflächenkontamination sind repräsentative Wischproben und laboranalytische Cr(VI)-Bestimmungen erforderlich. Diese bewerten einen anderen Teil der Gefährdung als tätigkeitsbezogene Luftmessungen. Die Expositionswege sind entsprechend Abschnitt 24 jeweils eigenständig zu betrachten.

## D. Fahrzeuge

### 20. Fahrzeugmotoren und Motorräume

Die Fahrzeugwarnungen verbinden den industriellen Bildungsweg mit dem automobilen Wartungsbereich.  beschreibt die Bildung auf heißen Oberflächen chromhaltiger Abgaskomponenten.  benennt tatsächlich festgestellte Kontaminationen, adressiert ausdrücklich Arbeiten im Motorraum sämtlicher Modelle und berücksichtigt neben Inhalation auch Hautkontakt und Hand-zu-Mund-Übertragung. Die beiden Unterlagen benennen keine abschließende Speziation als Calcium- oder Natriumchromat. [22, 23]

#### Konkreter Automotive-Einsatz: Morgan Superwool Plus Heat Shield

Morgan bewirbt Superwool Plus Heat Shield im Datenblatt 09/2019 ausdrücklich für vibrationsbeanspruchte Fahrzeug-Hitzeschilde. Es handelt sich um eine flexible calcium-/magnesiumsilikatische Fasermatte, keine starre Calciumsilikatplatte. Das Blatt nennt folgende Oxidzusammensetzung und Einsatztemperaturen. [48]

| Angabe im Produktdatenblatt          | Wert    |
|--------------------------------------|---------|
| SiO <sub>2</sub>                     | 62-68 % |
| CaO                                  | 26-32 % |
| MgO                                  | 3-7 %   |
| Heiße Oberfläche, Dauerbetrieb       | 750 °C  |
| Heiße Oberfläche, kurzzeitige Spitze | 850 °C  |

Die Sicherheitsdarstellung behandelt Biopersistenz und Fasereinstufung; eine Chromatwarnung fehlt. Die Verfügbarkeitstabelle des Blattes nennt Europa. [48]

Morgans Systemseite beschreibt Superwool Plus als Dämmoption innerhalb von Edelstahlkapselungen. Genannte Anwendungen sind Katalysatoren, Pkw-Abgaskrümmen, Turboanwendungen bei Off-Road-Fahrzeugen und Abgaskrümmen in Schifffahrt/Energieerzeugung. Als Kapselmaterialien werden unter anderem austenitische und ferritische Edelstähle genannt. [49]

**Damit ist die gezielte Vermarktung eines calciumhaltigen Dämmstoffs für automobile Heißeilanwendungen dokumentiert.** Faserchemie, chromhaltige Kontakt-/Kapseloberfläche und thermische Beanspruchung sind zusammen zu bewerten. Der als CaO angegebene Gehalt ist ein Gefährdungshinweis; seine Reaktionsverfügbarkeit ist im konkreten Aufbau zu prüfen. Eine Entlastung der Ausgangsfaser erfasst keine spätere Gefahrstoffbildung. Der in Abschnitt 10 nachgewiesene Grenzflächenpfad begründet eine konkrete Kompatibilitäts- und Informationsfrage. [11, 48, 49]

### Konsequenzen für Fahrzeuge

Bei einem nachweislich mit Cr(VI) kontaminierten Fahrzeug ist der Gefahrstoffbefund zugleich eine Eigenschaft des Fahrzeugs und seiner Bauteile. Er betrifft die sichere Handhabung, Instandhaltung, Wiederverwendung von Komponenten und die Kosten einer erforderlichen Abhilfe. Damit entsteht eine eigenständige Frage nach Produktzustand und Fahrzeugbewertung. Die vorliegenden OEM-Warnungen und Oberflächenbefunde geben hierfür einen konkreten technischen Ausgangspunkt. [5, 22, 23]

### Welche Folgen am Fahrzeug zu erfassen sind

| Bereich                      | Konkrete Fahrzeugfolge                                                                                                                                                      | Nachvollziehbare Grundlage                                                                                                                                                          |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wartung und Handhabung       | Berührbare oder bei Arbeiten freisetzbare Rückstände können besondere Arbeitsverfahren erfordern; betroffen sein können auch Pannenhilfe und vorgesehene Haltertätigkeiten. | Bauteil- und tätigkeitsbezogene Befunde, Zugänglichkeit, Freisetzung und Herstelleranleitungen. Eine Motorraumkontamination ist gesondert von einer Innenraumbelastung zu erfassen. |
| Abhilfe und Wiederkehr       | Dekontamination, gegebenenfalls Austausch belasteter Dämmelemente und Änderung des reaktiven Kontakts. Wiederkehrende Belastung kann wiederholten Aufwand verursachen.      | Umfang und Kosten der Arbeiten; Wirksamkeitskontrolle und Befunde nach erneutem thermischen Betrieb.                                                                                |
| Kosten und Fahrzeugwert      | Zusätzliche Wartungs-/Entsorgungskosten, Ausfallzeiten und gegebenenfalls verbleibender Minderwert trotz Abhilfe.                                                           | Rechnungen, dokumentierte Nutzungseinschränkungen und sachverständige Bewertung. Eine pauschale Wertminderung allein aus dem Stoffnamen ist keine belastbare Bezifferung.           |
| Halter- und Marktinformation | Information über betroffene Ausführungen, relevante Tätigkeiten, Schutz und Abhilfe; Weitergabe an unabhängige Werkstätten, Gebrauchtwagenkäufer und Flottenbetreiber.      | Datierte Warnungen, deren tatsächliche Verteilung sowie Zuordnung der betroffenen Fahrzeug- und Bauteilausführungen.                                                                |

Ein technisch funktionsfähiger Motor beantwortet die Frage nach sicherer Handhabung und üblichen Wartungsbedingungen nicht abschließend. Ebenso ist eine Warnung an Vertragswerkstätten getrennt davon zu bewerten, ob Halter, unabhängige Reparaturbetriebe und spätere Erwerber die erforderliche Information erhalten. Maßgeblich ist die konkrete Tätigkeit: Motorhaubenöffnung, Nachfüllen oder Pannenhilfe sind hinsichtlich der tatsächlich zugänglichen belasteten Stellen zu untersuchen; eine Exposition bei jeder dieser Tätigkeiten wird nicht vorausgesetzt.

Eine dauerhafte technische Abhilfe muss vorhandene Kontamination und die Ursache möglicher Neubildung zusammen behandeln. Bleibt die reaktive Materialkombination erhalten, ist die Wirksamkeit einer einmaligen Reinigung auch nach erneutem Betrieb zu prüfen. Chromat kann erst während der Nutzung entstehen, obwohl die dafür maßgebliche Material-/Kontaktkonstellation bereits bei Auslieferung vorhanden war. Für die Zuordnung sind Serienstand, thermische Beanspruchung und spätere Umbauten festzuhalten. [11, 22, 23, 26, 38]

## Rechtliche Ansatzpunkte in der EU

| Prüfweg                                     | EU                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fahrzeug als Kaufgegenstand</b>          | Im Verbraucherkauf gehören erwartbare Sicherheit und übliche Verwendbarkeit zur Vertragsmäßigkeit. Bei Vertragswidrigkeit kommen Nachbesserung/Ersatzlieferung und unter den jeweiligen Voraussetzungen Minderung oder Vertragsbeendigung in Betracht. [46] |
| <b>Sicherheit und behördliche Maßnahmen</b> | Die Fahrzeugverordnung 2018/858 regelt Abhilfe und Information bei Nichtkonformität beziehungsweise erstem Risiko. Die Einordnung eines chromatbelasteten Fahrzeugtyps verlangt eine konkrete Risikobewertung. [47]                                         |

Die EU-Verbraucherkauftregeln betreffen Ansprüche gegen den Verkäufer nach nationaler Umsetzung; Art. 7, 10 und 13 der Richtlinie 2019/771 verbinden Sicherheitsanforderungen mit Lieferzeitpunkt, Haftungszeitraum und Abhilfen. Bei Firmen- und Behördenflotten sind dagegen die jeweiligen Beschaffungs-/Kaufverträge und nationalen Mängelregeln heranzuziehen. Eine Materialursache beim Zulieferer hebt die Bewertung des verkauften Gesamtfahrzeugs nicht auf. [46]

Art. 14 der Verordnung 2018/858 ist ein konkreter Ansatz zur Prüfung erforderlicher Herstellermaßnahmen. Ob eine konkrete Cr(VI)-Konstellation als Nichtkonformität beziehungsweise ernstes Risiko einzuordnen ist, ist die zu bearbeitende Bewertungsfrage. [47]

**Ein begründeter Fahrzeugmangel und seine Abhilfekosten eröffnen einen wirtschaftlichen Prüfweg.** Eine Krebserkrankung ist für kaufrechtliche Mängelansprüche keine Voraussetzung. Behördliche Maßnahmen nach der Verordnung 2018/858 richten sich nach deren Tatbestand. [46, 47]

## E. Verbrennungsrückstände: Aschen, Kesselablagerungen, Feuerbestattung

### 21. Verbrennungsaschen und Kesselablagerungen

Der Untersuchungsbereich umfasst ausdrücklich die auf dem Rost verbleibenden Aschereste, Bodenasche, Feuerraumrückstände und Ablagerungen auf chromlegierten Heißeilen, zusätzlich zu Flug-, Filter- und Kesselaschen. Diese Fraktionen sind unterschiedliche Probenmatrices. Chrom kann aus dem Verbrennungsgut stammen; bei Kontakt mit chromlegierten Bauteilen ist außerdem deren Oberflächen-/Korrosionschemie einzubeziehen. Reaktionsverfügbares Calcium und Alkalikomponenten können aus den Rückständen selbst kommen. Eine Dämmung als Calciumquelle ist hierfür keine Voraussetzung. [11, 26, 31-34]

#### Paoletti 2002: Calciumchromat in der Abfallverbrennung

Bereits 2002 untersuchte Paoletti am deutschen Forschungszentrum Karlsruhe das Verhalten oxyanionenbildender Schwermetalle in der Hausmüllverbrennung (Dissertation Universität Stuttgart, FZKA 6755). Thermogravimetrische Versuche mit  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  und  $\text{CaO}$  in synthetischer Luft zeigten eine schnelle Massenzunahme zwischen 500 und 850 °C. Nach einer Stunde bei 850 °C wies die Röntgenbeugung sechswertiges  $\text{CaCrO}_4$  nach. In inerter Atmosphäre entstand dagegen nur dreiwertiges  $\text{Ca}(\text{CrO}_2)_2$ . [50]

Paoletti folgert, dass sechswertige Chromate nur gebildet werden können, „wenn der Sauerstoffpartialdruck in der Brennkammer ausreichend ist“. Ähnliche Reaktionen erwartet sie auch mit Natrium, Kalium, Magnesium, Strontium und Barium. In der Pilotanlage TAMARA lag das im DEV-S4-Eluat der Rostaschen gelöste Chrom bei Luftzahlen von 0,7 bis 1,5 zu 85 bis 100 % als **Cr(VI)** vor; bei einer Luftzahl von 0,6 sank die Freisetzung um fast zwei Größenordnungen. [50]

Vehlow, Paoletti, Seifert und Sirini stellten die Ergebnisse 2004 beim WTER Fall Meeting an der Columbia University in New York vor, einschließlich der Thermogravimetrie zu  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  und  $\text{CaO}$  mit dem Produkt  $\text{CaCrO}_4$ . Der Bildungsweg war damit seit 2004 auch auf internationaler Fachebene vorgestellt. [51]

#### Thermische Nachbehandlung von Flugaschen

Hu et al. beschreiben 2015 die Oxidation von Chrom bei der Müllverbrennung durch Alkali- und Erdalkalimetalle. Der ausgewertete Verlagsabstract hebt die Verfügbarkeit von freiem  $\text{CaO}$  hervor; Alkalikomponenten begünstigen die Oxidation bei niedrigeren Temperaturen im Zusammenhang mit der Rauchgasabkühlung. In Sulfaten oder Aluminosilikaten gebundenes Calcium ist hinsichtlich seiner Reaktionsverfügbarkeit gesondert zu betrachten. Gesamtcalcium beziehungsweise ein als  $\text{CaO}$  angegebener Oxidgehalt allein beschreibt daher noch nicht den Umsatz zu Calciumchromat. [31]

Bereits Hu et al. (2013) untersuchen Flugaschen aus fünf chinesischen Müllverbrennungsanlagen und deren thermische Nachbehandlung bei 1.023-1.323 K, entsprechend etwa 750-1.050 °C, in Luft oder Stickstoff. Der Verlagsabstract beschreibt die Bildung von  $\text{CaCrO}_4$  aus  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  und  $\text{CaO}$  bei der thermischen Behandlung. Die anfänglich untersuchten Aschen zeigen demgegenüber nur kleine **Cr(VI)**-Anteile und geringe Auslaugung. Das Ergebnis betrifft die Veränderung durch Nachbehandlung; es ist keine pauschale Aussage über sämtliche Rohaschen. [32]

Gong et al. (2017) ergänzen diesen Aspekt für eine chinesische Flugasche aus der Rauchgasreinigung: Nach thermischer Behandlung nimmt die Chromauslaugung zu, während sich die Auslaugung mehrerer anderer Metalle verringert. Die Autoren führen die Veränderung auf Cr(VI)-Verbindungen wie  $\text{CaCrO}_4$  zurück. Im Eluat wurde Gesamtchrom gemessen; der Calciumchromatpfad ist die mechanistische Erklärung der Autoren, kein eigenständiger Cr(VI)-Speziationsnachweis dieser Messreihe. Eine verbesserte Immobilisierung einzelner Metalle erlaubt somit keine allgemeine Entlastung hinsichtlich Chrom. [33]

### Rostaschen beim Abfahren: Temperaturverlauf und Sauerstoffzutritt

Beim Abfahren zur Wartung verbleiben Aschereste auf einem chromhaltigen Rost beziehungsweise auf chromlegierten Heißeiloberflächen, während sich Temperatur und Atmosphäre ändern. Dieser Vorgang ist vom Transport von Flugstaub im laufenden Betrieb zu unterscheiden.

Paoletti liefert die Bausteine für diesen Vorgang: Calciumoxid ist im Hausmüll mit rund 3 % vorhanden; Calciumchromat bildet sich zwischen 500 und 850 °C und wird oberhalb von 850 °C wieder zu dreiwertigem Chromat reduziert; Sauerstoff ist zwingende Voraussetzung. Beim Abfahren durchlaufen Rost und Aschereste genau dieses Temperaturfenster, während durch Ausbrand und Öffnen zusätzlicher Sauerstoff hinzutritt. Eine zusätzliche Chromatbildung beziehungsweise Anreicherung in den verbleibenden Rückständen ist damit chemisch zu erwarten. [50]

Die Bedeutung der Atmosphäre bestätigt auch Leaching behavior of heat-treated waste ash (2006): Die Autoren untersuchen Bodenaschen aus zwei japanischen kommunalen Rostfeuerungsanlagen und variieren Temperatur, Sauerstoffkonzentration und Behandlungszeit. Eine sauerstoffärmere thermische Behandlung vermindert das auslaugbare Cr(VI). [43]

Dass dieser Effekt bekannt ist, zeigt ein Holzascheverfahren, das den Sauerstoffkontakt gezielt erst unter 200 °C zulässt, um die Cr(VI)-Bildung zu verhindern (Brill 2002, zitiert im Bericht des deutschen Umweltbundesamts 2019, S. 72). Der Bericht erwägt zudem eine inerte Nachbehandlung von Kremationsasche. [44]

Direkte Vergleichsmessungen an Müllverbrennungsanlagen vor und nach dem Abfahren liegen bislang nicht vor; sie würden die Größenordnung bestimmen, nicht den Mechanismus.

Für ein konkretes Asche- oder Ablagerungsproblem sind Fraktion, Anlage, Betriebszustand, Probenahme, Cr(VI)-Analytik und Tätigkeit zuzuordnen.

Gesamtchrommessung, Auslaugungsprüfung und personenbezogene Staubbemessung beantworten jeweils unterschiedliche Fragen.

## 22. Wissensstand in Europa zu Verbrennungsrückständen

| Region / Quelle                           | Dokumentiertes Wissen                                                                                                                                            | Bedeutung für die Bewertung                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EU, 2019: JRC-BREF [34]                   | Das Referenzdokument für Abfallverbrennung benennt sechswertiges Chrom unter den problematischen Metallen hinsichtlich Auslaugung aus Bodenasche.                | Expliziter Umweltbezug. Eluat-/Umweltbewertung ersetzt keine Beurteilung der Staubexposition bei Wartung und Revision.                                       |
| Großbritannien: HSE / Praxisfall [30, 40] | HSE verlangt die Bewertung von Flugasche-Risiken und die Vermeidung luftgetragener Asche. Der Praxisfall berichtet Cr(VI) in Ablagerungen bei Revisionsarbeiten. | Geografisch Europa, rechtlich gesondert von der EU. Der Fall beschreibt eine konkrete Tätigkeit; er ist keine repräsentative Untersuchung des Schutzregimes. |

Auch die europäische Umweltliteratur benennt Cr(VI) ausdrücklich: Im europäischen BVT-Merkblatt Abfallverbrennung (JRC-BREF) von 2019 steht es neben Kupfer, Molybdän und Zink als problematischer Stoff hinsichtlich der Auslaugung aus Bodenasche. Für diese Aussage wurde die entsprechende amtlich indexierte Fundstelle ausgewertet, nicht das gesamte umfangreiche Dokument. Die Umweltperspektive beantwortet andere Fragen als die tätigkeitsbezogene Arbeitsschutzbewertung. [34]

Der Euro-Environmental-Beitrag ist berücksichtigt: Er beschreibt Cr(VI)-positive Ablagerungen in den Kesselzügen 2-6 eines nicht benannten britischen Betreibers und die Exposition bei Wartung und Revision. Die dort beschriebene Abkühlung betrifft den Rauchgasweg durch aufeinanderfolgende Kesselzüge; sie ist nicht als Messung der Chromatneubildung beim zeitlichen Herunterfahren zu lesen. Berichtet werden Luft-/Umgebungsüberwachung, Biomonitoring, Eisensulfatbehandlung, Absaugung und abgeschottete Bereiche. Numerische Vorher-/Nachher-Werte fehlen; die gelbe Farbe liefert keine belastbare Salzidentifikation. Der Fall belegt die Bearbeitung einer konkreten Revisionsgefährdung und ergänzt die gesonderte Fragestellung zu Rückständen auf dem Rost. [30]

### Feldbeobachtungen zum Schutzregime

Feldbeobachtungen in europäischen Müllverbrennungsanlagen zeigen, dass der Schutz gegen Chromatbelastungen allenfalls teilweise umgesetzt wird. Eine systematische Anlagenstichprobe, konkrete Messreihen und eine Bewertung einzelner Betreiber sind damit nicht verbunden.

Die daraus folgende Untersuchungsfrage ist, ob die Gefährdungsbeurteilungen auch Revision, Kesselöffnung, Entfernung von Ablagerungen, Reinigung, Aschehandhabung und Verschleppung abdecken. Zu erfassen wären die jeweils betroffene Rückstandsfraktion, analytische Speziation, Freisetzung beim Arbeitsvorgang und praktisch eingesetzte Schutzmaßnahmen. Das lässt sich anhand vorhandener Arbeitsfreigaben, Messberichte und Revisionsunterlagen nachvollziehen.

## 23. Feuerbestattungen und weitere chromhaltige Verbrennungsgüter

---

Das deutsche Umweltbundesamt (UBA) untersuchte 2019 wegen rechtlicher Beschränkungen 25 Modellaschen aus Leerverbrennungen von Särgen in fünf Kremationsöfen. Alle enthielten Cr(VI). Bei der Extraktion mit 0,01 M CaCl<sub>2</sub>, Asche/Lösung 1:50, gingen im Mittel 17 % des Gesamtchroms in Lösung; das gelöste Chrom lag vollständig als Cr(VI) vor. Der Bericht beschreibt prozessbedingte Chromeinträge und Boden-/Grundwasserrisiken. Calcium liegt wesentlich als Calciumphosphat vor; Gesamtcalcium ist kein Nachweis freien CaO. [44]

Abgasemissionen, zurückbleibende Asche und die spätere Freisetzung aus einer Urne sind getrennte Expositions- beziehungsweise Umweltpfade. Ein Emissionsfaktor beschreibt keine Aschekonzentration; eine Eluatuntersuchung beschreibt keine Atemluftbelastung. Der technische Zusammenhang ist dennoch derselbe Untersuchungsanlass: Chromquelle, reaktionsverfügbare basische Komponenten, Temperatur-Zeit-Verlauf und Atmosphäre des Prozesses sind zusammen zu erfassen. Welche konkrete Chromatphase entsteht, wird durch passende Speziations- und Phasenanalytik geklärt.

Der Porto-Nachweis 10216/21130 gehört zu Ferreira, Almeida und Pinto (1999): Influence of temperature and holding time on hexavalent chromium formation during leather combustion. Untersucht wurden Lederreste. Laut Verlagsabstract lag Cr(VI) vor der Verbrennung unter 5 mg/kg; in den Aschen entstanden relevante, temperatur- und halbezeitabhängige Mengen. Die Quelle ergänzt die thermische Cr(III)/Cr(VI)-Umwandlung bei chromhaltigem Verbrennungsgut. Ausgewertet wurde das Abstract; die Untersuchung betrifft keine menschlichen Feuerbestattungen. [45]

## F. Gesundheit, Regulierung, offene Fragen und Schlussfolgerung

### 24. Gesundheitliche und ökologische Konsequenzen der Chromate

Die Reaktionsprodukte sind nicht nur chemisch relevant. Die hier betrachteten Calcium- und Natriumchromate sind krebserzeugend; Hautkontakt, lokale Hautwirkungen und mögliche Aufnahme sind zusätzlich zur Inhalation zu bewerten. Bei Verletzungen können einzelne Cr(VI)-Verbindungen schwere Hautgeschwüre verursachen. [2, 3]

#### Aufnahme in die Zelle: das trojanische Pferd

Wasserlösliche Chromate sind strukturgleich mit Sulfat- und Phosphationen. Die Zelle nimmt sie deshalb über ihre Sulfat- und Phosphat-Transportwege auf, als handle es sich um ein gewöhnliches Nährstoffanion. Chrom(VI) gelangt so ungehindert in das Zellinnere, während dreiwertiges Chrom die Zellmembran kaum passiert. [53]

#### Reduktion im Zellinneren: DNA-Schäden und oxidativer Stress

Im Zellinneren wird Chrom(VI) durch Ascorbat, Glutathion und Cystein schrittweise über die reaktiven Zwischenstufen Chrom(V) und Chrom(IV) zum stabilen Chrom(III) reduziert. Dabei entstehen nach der Bewertung der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) Chrom(III)-DNA-Addukte, DNA-Protein- und DNA-DNA-Quervernetzungen, DNA-Strangbrüche einschließlich Doppelstrangbrüchen sowie oxidative Basenschäden. Die vorherrschende Form sind ternäre Addukte, bei denen Chrom(III) die DNA mit kleinen Molekülen wie Cystein, Histidin, Glutathion oder Ascorbat verknüpft. Die reaktiven Zwischenprodukte der Reduktion erzeugen zusätzlich oxidativen Stress. [53]

Im Zellkern ist es damit das dreiwertige Chrom, das die DNA schädigt. Die verbreitete Gleichsetzung von Chrom(III) mit Unbedenklichkeit greift deshalb zu kurz: Entscheidend ist, ob Chrom in die Zelle gelangt.

#### Epidemiologische Grundlage: die Kohorten der Chromatindustrie

Die krebserzeugende Wirkung ist nicht nur aus Tierversuchen abgeleitet, sondern an Beschäftigten der Chromatindustrie belegt. Die US-Arbeitsschutzbehörde OSHA stützte ihren 2006 erlassenen Grenzwert von 5 µg/m³ vor allem auf zwei Kohorten aus der Chromatherstellung: die Beschäftigten des Werks in Baltimore (Gibb et al. 2000; 2.357 Männer, beobachtet von 1950 bis 1992) und die des Werks in Painesville, Ohio (Luippold et al. 2003). Die IARC stuft Chrom(VI)-Verbindungen als krebserzeugend für den Menschen ein (Gruppe I), mit gesicherter Wirkung auf die Lunge und beobachteten Zusammenhängen mit Krebs der Nase und der Nasennebenhöhlen. [53, 54]

#### Einstufung der Zielchromate

Nach der harmonisierten europäischen Einstufung ist Calciumchromat krebserzeugend der Kategorie 1B (H350) sowie sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H400, H410). Natriumchromat ist zusätzlich als erbgutverändernd, fortpflanzungsgefährdend, hautsensibilisierend und ätzend eingestuft. [3]

### Hautkontakt

Hautkontakt ist eigenständig zu bewerten. Längerer Kontakt kann zu Dermatitis und Hautgeschwüren führen; ein Teil der Exponierten entwickelt eine allergische Sensibilisierung, bei der schon geringe Mengen schwere Hautreaktionen auslösen. Kontaminierte Bauteile, Dämmstoffe, Werkzeuge und Handschuhe bleiben deshalb auch dann eine Gefährdung, wenn die Luftmessung unauffällig ist. Die deutsche TRGS 561 verlangt bei Hautkontakt mit Chrom(VI)-Verbindungen besondere Schutzmaßnahmen. [19, 56]

### Nicht jedes Chrom(VI) ist gleich: die einzelnen Chromate

In der Praxis wird meist pauschal von „Chrom(VI)“ gesprochen. Diese Verallgemeinerung schadet, weil sie die einzelnen Chromate aus dem Blick nimmt. Löslichkeit, Partikelverhalten, Verweilzeit in der Lunge und Einstufung unterscheiden sich erheblich. In einem britischen Vergleichsversuch an der Rattenlunge (Levy et al. 1986) verursachten schwerlösliche Chromate signifikant Lungentumoren: Strontiumchromat bei 43 und 62 von 99 Tieren, Calciumchromat als Positivkontrolle bei 25 von 100, Zinkchromat dagegen nur bei 5 beziehungsweise 3 von 100. [55]

Calciumchromat, das Hauptprodukt der In-situ-Bildung an calciumhaltigen Dämmstoffen und in Aschen, gehört damit zu den im Tierversuch wirksamsten Chromaten. Eine Bewertung, die nur „Chrom(VI)“ erfasst und die Verbindung nicht benennt, verdeckt diese Unterschiede.

### Alle Expositionswege sind einzeln zu beurteilen

Artikel 3 Absätze 2 und 3 der europäischen Richtlinie 2004/37/EG verlangt die Bewertung möglicher Expositionen einschließlich weiterer Expositionswege, insbesondere der Aufnahme in beziehungsweise über die Haut. Für diese Tätigkeiten sind die folgenden Wege jeweils eigenständig und anschließend in der Gesamtbewertung zu berücksichtigen: [18]

- Inhalativ: Freisetzung und Einatmen von Chromatstäuben bei Wartung, Öffnung, Demontage, Reinigung oder Handhabung; tätigkeitsbezogene Luftmessungen bewerten diesen Weg.
- Dermal: Kontakt mit kontaminierten Bauteilen, Dämmstoffen, Werkzeugen, Handschuhen oder Flüssigkeiten; Hautbelastung, mögliche Aufnahme und lokale Wirkungen sind gesondert zu beurteilen.
- Oral: Hand-zu-Mund-Transfer über kontaminierte Hände, Gegenstände, Nahrung oder Getränke; Arbeitsabläufe, Hygiene und Verschleppung sind zu berücksichtigen.

**Eine niedrige Luftkonzentration ist kein allgemeines Entlastungskriterium.** Sie beantwortet nicht die Fragen nach Hautkontakt, oraler Aufnahme oder Oberflächenkontamination. Die deutsche TRGS 561 verlangt in Abschnitt 3.3.4 besondere Schutzmaßnahmen bei Hautkontakt mit Cr(VI)-Verbindungen. [19]

### Umwelt

Für die hier naheliegenden Zielverbindungen ist zudem die Umweltgefährdung wesentlich. Calciumchromat und Natriumchromat sind als sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung (H410) einzustufen. Die Bildung dieser Chromate betrifft daher zugleich den Arbeitsschutz, das Abfall- und Rückstandsmanagement sowie den Gewässerschutz.

Der Umstand, dass das Ausgangsprodukt als Dämmstoff verkauft wird, ändert an der Gefahrstoffrelevanz der unter bestimmungsgemäßer thermischer Beanspruchung entstehenden Reaktionsprodukte nichts.

Wie weit sich Chrom(VI) in der Umwelt ausbreiten kann, zeigt der Fall Hinkley in Kalifornien, bekannt durch den Film Erin Brockovich (2000): Zwischen 1952 und 1966 setzte das US-Energieunternehmen PG&E Chrom(VI) als Korrosionsschutz im Kühlturmwasser einer Verdichterstation ein. Das Abwasser gelangte über unbefestigte Becken ins Grundwasser und belastete eine Fläche von rund drei Kilometern Länge und anderthalb Kilometern Breite. [57]

### Vertiefung der inhalativen Gesundheitsrisiken: Speer et al. (2022)

Die vorgelegte amerikanische Arbeit untersucht partikuläres Zinkchromat ( $\text{ZnCrO}_4$ ) an nicht malignen, immortalisierten menschlichen bronchialen Fibroblasten. Exponiert wurde mit 0,1, 0,2 und 0,3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  über 24, 72 und 120 Stunden. Die Autoren erfassen Veränderungen der microRNA-Expression mittels Sequenzierung und überprüfen ausgewählte Befunde zusätzlich mit qPCR. Die untersuchte Verbindung ist Zinkchromat, nicht Calcium- oder Natriumchromat. [39]

Die veränderten microRNAs betreffen nach der bioinformatischen Ziel- und Signalweganalyse zentrale Bereiche der Krebsentstehung: Chromosomeninstabilität, Entzündung, oxidativen Stress, Umgehung des Zelltods und zelluläre Transformation. Gemessen wurden die Expressionsänderungen; nicht jede daraus abgeleitete Gen- oder Signalwegwirkung wurde als funktioneller Endpunkt unmittelbar geprüft. Die Arbeit vertieft damit die mechanistische Einordnung partikulärer Cr(VI)-Belastung an menschlichen Lungenzellen. [39]

Für die Bewertung von Chromatstäuben ist dies ein relevanter biologischer Bezug: Zelluläre Regulations- und Reparaturprozesse können betroffen sein, auch wenn eine spätere Routineuntersuchung keine frühere Exposition rekonstruiert. Die Zellkulturdosis in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  ist jedoch keine Luftkonzentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; die Versuchsreihe ist weder eine Inhalations-Kohortenstudie noch eine Messung des Erkrankungsrisikos an einer konkreten Anlage. Verbindung, Löslichkeit, Partikelverhalten und tatsächlich aufgenommene Dosis bleiben bei der Übertragung auf andere Chromate zu berücksichtigen. [39]

### Luftmessung, Biomonitoring und Langzeitwirkung sind unterschiedliche Ebenen

Eine Arbeitsplatz-Luftmessung beschreibt die beprobte Tätigkeit und Zeitspanne. Urin-Chrom dient der Bewertung einer aufgenommenen Chrombelastung; die britische EH40 führt den biologischen Richtwert als Chrom im Urin, nicht als unmittelbare Cr(VI)-Speziationsmessung. Ein solcher Wert rekonstruiert weder zuverlässig eine weit zurückliegende Belastung noch bereits entstandene genotoxische Veränderungen. Die drei Ebenen dürfen deshalb nicht als gegenseitige Ersatznachweise verwendet werden. [39, 42]

Im britischen Arbeitsschutz verlangt die britische Behörde HSE ebenfalls die Betrachtung aller Aufnahmewege, einschließlich Haut und Verschlucken; bei krebserzeugenden Stoffen ist die Exposition so weit wie vernünftigerweise praktisch möglich zu vermindern. Der britische Praxisfall wird daher als eigener europäischer Anwendungsbeleg geführt, nicht als Nachweis des aktuell geltenden EU-Rechts oder eines gemeinsamen europäischen Grenzwertes. [41]

## 25. Industriell hergestellt oder in situ gebildet: ungleiche Kontrolle

---

Chrom(VI)-Verbindungen werden in Regelwerk und Öffentlichkeit fast ausschließlich in ihrer industriell hergestellten Form betrachtet, so wie sie das Udy-Patent als Produkt eines gezielten Verfahrens beschreibt. Für diese Form gelten strenge Vorgaben: Herstellung und Verwendung unterliegen in der EU der Zulassungspflicht und künftig einer Beschränkung, Arbeitsplätze werden überwacht, Emissionen begrenzt, und Gemische wie chromathaltige Farben und Grundierungen tragen eine Gefahrenkennzeichnung mit Piktogramm und dem Gefahrenhinweis H350. [1, 3, 59]

Die In-situ-Bildung bleibt dagegen weitgehend unbeachtet oder wird verdrängt. Calcium- und Natriumchromat entstehen während des bestimmungsgemäßen Betriebs auf Heißeilen, in Dämmstoffen und in Verbrennungsrückständen, ohne dass ein Hersteller sie in Verkehr bringt, ohne Kennzeichnung und meist ohne ein Sicherheitsdatenblatt, das den Zustand nach Gebrauch beschreibt. Exponiert sind Monteure, Servicetechniker, Isolierer, Kfz-Mechaniker, Revisionspersonal und Entsorger, häufig ohne es zu wissen. Die gesundheitlichen Folgen sind dieselben wie bei der industriell hergestellten Form: Lungenkrebs, Krebs der Nase und der Nasennebenhöhlen, Hautgeschwüre und allergische Kontaktdermatitis. Hinzu kommt die Belastung von Boden und Gewässern über Stäube, Aschen und Abfälle. [53, 56]

### Regulatorische Entwicklung

Australien vollzieht den Schritt zur Minimierung bereits: Ab dem 1. Dezember 2026 gibt die australische Behörde Safe Work Australia für nicht schwellenwertbasierte genotoxische Karzinogene keine Arbeitsplatzgrenzwerte mehr aus; Chrom(VI)-Verbindungen gehören ausdrücklich dazu. An die Stelle des Grenzwerts tritt die Pflicht, die Exposition zu beseitigen oder so weit wie vernünftigerweise praktikabel zu minimieren (SFAIRP, vergleichbar dem ALARP-Prinzip). [58]

In der EU hat die Europäische Chemikalienagentur ECHA im April 2025 eine Beschränkung von Chrom(VI)-Stoffen vorgeschlagen, die das bisherige Zulassungsverfahren ablösen soll. Danach sollen nur noch bestimmte Verwendungen unter strengen Bedingungen zulässig bleiben, mit Arbeitsplatzgrenzwerten zwischen 0,1 und 5 µg Cr(VI)/m³ je nach Verwendung sowie Emissionsgrenzen für Luft und Wasser; alle übrigen Verwendungen wären untersagt. [59]

Maßgeblich ist dabei der weite Verwendungsbegriff der europäischen REACH-Verordnung. Nach Artikel 3 Nummer 24 ist „Verwendung“ jedes „Verarbeiten, Formulieren, Verbrauchen, Lagern, Bereithalten, Behandeln, Abfüllen in Behältnisse, Umfüllen von einem Behältnis in ein anderes, Mischen, Herstellen eines Erzeugnisses oder jeder andere Gebrauch“. Schon das Lagern einer ausgebauten, mit Chromatstäuben kontaminierten Wärmedämmung kann danach eine Verwendung darstellen; die Wiederverwendung einer solchen Dämmung ist erst recht eine Verwendung. Fällt sie nicht unter die künftig zugelassenen Verwendungen, ist sie untersagt. [60]

### Ungleiche Kontrolle in der Praxis: der Vergleich mit Asbest

Die Ungleichbehandlung endet nicht beim Regelwerk, sie setzt sich in der Praxis fort. Industriell hergestelltes Chrom(VI) wird in geschlossenen Anlagen verwendet, unterliegt der Zulassungspflicht, ist gekennzeichnet, wird mit Sicherheitsdatenblatt geliefert und von unterwiesenem Personal gehandhabt. In situ gebildetes Chrom(VI) wird dagegen als Ablagerung auf einer Oberfläche angetroffen. Es hat keinen Hersteller, keinen Lieferanten, keine Kennzeichnung und kein Sicherheitsdatenblatt. Damit fällt es aus der Kategorie Gefahrstoff heraus und in die Kategorie Verschmutzung. Behandelt wird es entsprechend, mit Lappen, Bürste, Sauger, Druckluft und Sprühmitteln, durch das vorhandene Wartungs- und Reinigungspersonal. Auch der verbreitete Begriff „Neutralisierung“ stammt aus dieser Sprachwelt und nicht aus dem Gefahrstoffrecht.

Der Vergleich mit Asbest zeigt die Lücke. Beide Stoffe sind als krebserzeugend für den Menschen eingestuft, und bei beiden entsteht die Gefährdung nicht im eingebauten Zustand, sondern wenn bei Wartung, Ausbau oder Reinigung Staub freigesetzt wird. Für Asbest ist daraus ein geschlossenes Verfahrensregime geworden. Die deutsche TRGS 519 in der Fassung vom 28. Februar 2025 verlangt unter Nummer 3.2, dass Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten der zuständigen Behörde „spätestens 7 Tage vor Beginn der Arbeiten anzuzeigen“ sind. Nummer 2.7 regelt die Sachkunde und ihren Nachweis, die Nummern 5.1 bis 5.3 die verantwortliche Person, den Aufsichtführenden und das Fachpersonal. Für schwach gebundene Asbestprodukte verlangen die Nummern 14.1 bis 14.3 Abschottung und lufttechnische Maßnahmen sowie Personen- und Materialscheunen [97].

Für die in situ gebildeten Chromate existiert nichts davon. Es gibt keine Anzeigepflicht vor Beginn der Arbeiten, keine eigene Sachkunde, keinen vorgeschriebenen Aufsichtführenden, keine Schwarz-Weiß-Anlage und keine zugelassenen Fachbetriebe. Die deutsche TRGS 561 verlangt persönliche Schutzausrüstung, staubarmes Arbeiten und die Substitutionsprüfung (Abschnitt 6), errichtet aber kein Verfahrensregime mit Anzeige, Sachkundenachweis und Abschottung. Niemand käme auf den Gedanken, eine asbesthaltige Platte eigenhändig mit einem Spray zu behandeln und anschließend abzuwischen. Bei einem chromatbelasteten Heißteil ist genau das die übliche Praxis.

Die Einstufung spricht in zwei Punkten sogar gegen diese Ungleichbehandlung. Natriumchromat trägt drei hautbezogene Gefahrenhinweise, gesundheitsschädlich bei Hautkontakt (H312), ätzend (H314) und hautsensibilisierend (H317) [65]; Asbest trägt in der harmonisierten Einstufung keinen. Calcium- und Natriumchromat sind zudem als sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung eingestuft (H400, H410) [64, 65], während die harmonisierte Einstufung von Asbest mit Carc. 1A (H350) und STOT RE 1 (H372) keine Umweltgefahr ausweist [98]. Die Chromate sind damit in der dermalen und in der ökologischen Dimension strenger eingestuft als der Stoff, für den das geschlossene Verfahrensregime gilt.

Die Beurteilung des Hautkontakts führt dabei unmittelbar zum höchsten Rang. Die deutsche TRGS 401 in der Fassung vom Oktober 2022, zuletzt geändert am 19. September 2024, stuft in Tabelle 2 des Abschnitts 4.2 die Gefährdung nach Kontaktart ein. Für die Zeile „Hautresorptiv und gleichzeitig nebenstehende gefährliche Eigenschaften“ gilt bei krebserzeugenden Stoffen der Kategorie 1A oder 1B (H350) in jeder Kontaktart die Einstufung „H“, also hohe Gefährdung, ohne Schwelle für Dauer oder Fläche. Hautsensibilisierende Eigenschaften allein (H317) führen erst bei mehr als 15 Minuten Kontakt je Arbeitstag und großflächigem Kontakt zu dieser Einstufung, nach Absatz 4 zusätzlich dann, wenn praktische Erfahrungen eine Sensibilisierung bei einer erheblichen Zahl von Beschäftigten zeigen [99].

Chrom(VI)-Verbindungen erfüllen beide Merkmale, und die Markierung ist amtlich vergeben. Die TRGS 401 entnimmt die Kennzeichnung „H“ für hautresorptive Stoffe nach Abschnitt 3.2.3 Absatz 2 den TRGS 900, 905 und 910; ist ein Stoff dort nicht geführt, kann die MAK- und BAT-Werte-Liste der Deutschen Forschungsgemeinschaft als weitere Informationsquelle herangezogen werden [99]. In Anlage 1 der TRGS 910 sind Chrom(VI)-Verbindungen mit  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  der einatembaren Fraktion und dem Überschreitungsfaktor 8 geführt, mit dem Hinweis „siehe TRGS 561“, aber ohne Hautmarkierung [101]. Die MAK- und BAT-Werte-Liste 2026, Mitteilung 62, führt unter „Chrom(VI)-Verbindungen (einatembare Fraktion)“ dagegen beide Markierungen: Hautresorption „H“ und Sensibilisierung „Sh“, dazu Kanzerogenitätskategorie 1 und Keimzellmutagenitätskategorie 2. Von der H-Markierung ausgenommen sind ausdrücklich nur Barium-, Blei-, Strontium- und Zinkchromat, von der Sh-Markierung nur Barium- und Bleichromat. Calcium- und Natriumchromat, die hier behandelten Verbindungen, fallen unter keine dieser Ausnahmen [102].

Damit ist die Einstufung des Hautkontakts eindeutig. Ein Stoff, der nach der MAK- und BAT-Werte-Liste hautresorptiv ist und zugleich der Kanzerogenitätskategorie 1 angehört, fällt in Tabelle 2 der TRGS 401 in die Zeile „Hautresorptiv und gleichzeitig nebenstehende gefährliche Eigenschaften“ und ist dort bei jeder Kontaktart als hohe Gefährdung einzustufen, unabhängig von Dauer und Fläche [99]. Die zusätzliche Sh-Markierung und die harmonisierte Einstufung Sensibilisierung der Haut 1, H317, treten daneben; das Institut für Arbeitsschutz der deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung nennt für Chrom(VI)-Verbindungen die Aufnahmewege „inhalativ, hautresorptiv“ [100]. Für Asbest besteht keine vergleichbare Hautbewertung, weil die harmonisierte Einstufung dort keinen hautbezogenen Gefahrenhinweis enthält.

Damit stellt sich die Frage, woraus sich der Unterschied in der Handhabung rechtfertigt. Die Einstufung als krebserzeugend ist bei beiden Stoffgruppen gegeben, der Freisetzungsmechanismus über Staub bei Wartung und Ausbau ist derselbe, und für Calciumchromat ist die Wirksamkeit im Tierversuch dokumentiert (Abschnitt 24). Der Unterschied liegt nicht im Stoff, sondern darin, dass der eine als Produkt geliefert wurde und der andere im Betrieb entstanden ist.

## 26. Vermeintliche Abhilfen: Neutralisierung, WD-40 und das „harmlose“ Chrom(III)

### „Neutralisierung“

Mehrere der in dieser Analyse genannten Hersteller empfehlen, Chrom(VI)-Rückstände zu „neutralisieren“, und stellen dies als ausreichende Arbeitsschutzmaßnahme dar. Der Begriff suggeriert, Chrom(VI) lasse sich unschädlich machen. Tatsächlich handelt es sich um eine Redoxreaktion: Ein Reduktionsmittel wandelt Chrom(VI) in Chrom(III) um. Nahezu vollständig gelingt das nur unter günstigen Bedingungen, also bei ausreichendem Kontakt zwischen Reduktionsmittel und Chromat, ausreichender Menge, Feuchte und Einwirkzeit. Auf porösen Dämmstoffen, in Faserzwischenräumen, unter Ablagerungen und auf heißen oder trockenen Oberflächen liegen diese Bedingungen in der Praxis selten vor. [22, 25]

 hält selbst fest, dass ein Bauteil nach erneuter thermischer Belastung nicht mehr als neutralisiert gilt („If the component part is subjected to thermal stress again, it is no longer considered neutralized.“). Die Ursache bleibt bestehen: Solange Chrom, Calcium oder Natrium, Sauerstoff und Temperatur zusammentreffen, bildet sich das Chromat im nächsten Betriebszyklus neu. [11, 22, 50]

Die Behandlung von Chrom(VI) mit einem Reduktionsmittel ist zudem selbst eine Verwendung im Sinne von Artikel 3 Nummer 24 REACH („Behandeln“). Ob sie unter die geplante EU-Beschränkung fällt, entscheidet der endgültige Rechtstext. [59, 60]

### WD-40

In der Praxis wird das Kriechöl WD-40 teilweise als Mittel gegen Chrom(VI) angesehen und bei Wartungsarbeiten eingesetzt. Die Herkunft dieser Praxis lässt sich benennen. Das Safety Bulletin Summary des britischen Branchenverbandes Energy UK vom September 2019 hält fest, Mitglieder hätten Erfahrung mit dem Einsatz von WD-40 oder vergleichbaren Mitteln und Tüchern „to immobilise and wipe away Cr(VI) residue“. Beschrieben ist damit eine Staubbinding vor dem Abwischen, keine chemische Umwandlung. Dasselbe Dokument nennt bereits die drei Bedingungen der Entstehung, calciumhaltiges Produkt, Temperaturen über 300 °C und chromhaltiger Stahl, und verlangt, an allen Kraftwerksstandorten von der Anwesenheit auszugehen. [92]

Eine Reduktionswirkung hat WD-40 nicht. SEEF B.V. hat sie experimentell geprüft. Bei bereits gelöstem Chrom(VI) blieb die Wiederfindung nach Zugabe von 2 ml WD-40 bei 96,8 Prozent, 240,7 gegenüber 248,7 µg/l. Bei einer Referenz-Farbprobe mit vollständigem Aufschluss zeigte sich keine Dosisabhängigkeit; die Werte lagen zwischen 1.280,0 und 1.384,5 mg/kg gegenüber 1.265,0 mg/kg in der Kontrolle und damit sämtlich über der Kontrolle. Das Produkt besteht nach dem Sicherheitsdatenblatt des Herstellers aus 55 bis 75 Gewichtsprozent aliphatischen Kohlenwasserstoffen und Grundöl und enthält keine reduzierend wirkende Komponente. [91]

Der dritte Versuch erklärt, warum die Maßnahme dennoch als wirksam erscheint. Festes Chrom(VI) in direktem Kontakt mit WD-40, anschließend in Wasser gelöst, ergab eine Wiederfindung von 5,8 Prozent, weil das Chromat in der Ölphase verklumpte und der Messung entzogen blieb. Wer nach einer Ölbehandlung beprobt, misst einen Bruchteil des vorhandenen Chromats. Der Befund bestätigt die Maßnahme, während das Chromat unverändert auf dem Bauteil, im Reinigungsmaterial und im Abfall verbleibt (Abschnitt 17). [91]

### Das vermeintlich harmlose Chrom(III)

Häufig wird das reduzierte Chrom(III) als essenzielles und natürliches Spurenelement dargestellt. Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit EFSA fand 2014 jedoch keinen Beleg für eine Essenzialität von Chrom(III) und hielt die Festlegung einer angemessenen Zufuhrmenge für nicht angebracht. [61]

Zudem zeigt die Chrysotil-Studie von Walter et al. (2022), dass an Fasern gebundenes Chrom(III) unter oxidativen Bedingungen bei physiologischem pH als Chrom(VI) mobilisiert werden kann, das Lungen- und Mesothelzellen aufnehmen. Industriestäube können damit als Träger dienen, über die vermeintlich harmloses Chrom(III) in eine Form zurückkehrt, die in die Zelle gelangt. Im Zellkern ist es dann wiederum Chrom(III), das die DNA-Addukte bildet. [4, 53]

## 27. Eigene Feldbefunde

Die Grundlage dieser Expertise sind nicht allein fremde Unterlagen. Seit 2019 führen wir eigene Untersuchungen im Feld durch, teils selbst, teils durch beauftragte Dritte, und sie sind dokumentiert.

Untersucht wurde an Anlagen im Betrieb und in der Instandhaltung: Motoren und Blockheizkraftwerke, Kraftwerke, Verbrennungsanlagen innen und außen, Schiffsmotoren, Fahrzeuge und Baumaschinen. Dabei haben wir nahezu jedes am Markt verfügbare Dämmmaterial an unterschiedlichen Anlagen geprüft.

Eingesetzt wurden Wischproben, Materialproben und Laboranalysen, ausgewertet im mobilen Labor und durch externe Laboratorien. In der Anfangszeit haben auch wir den Schnelltest verwendet. Wir verwenden ihn nicht mehr, aus den Gründen, die in Abschnitt 19 dargestellt sind.

Diese Expertise behauptet nicht, dass jedes Bauteil betroffen ist, und sie will nichts überzeichnen. Nach sieben Jahren Feldarbeit können wir jedoch für keinen der genannten Anwendungsbereiche eine Nichtbelastung feststellen oder Entwarnung geben.

## 28. Was noch untersucht werden kann und was nicht mehr offen ist

### Isoliertechnik und Fahrzeuge

Untersuchungsbedarf kann im jeweiligen Anlagenfall bei der Kinetik, bei lokalen Sauerstoff- und Feuchtebedingungen, beim Einfluss von Temperaturzyklen, bei der Oberflächenchemie oder beim quantitativen Verhältnis einzelner Chromate bestehen. Diese Fragen betreffen die Ausprägung des Reaktionsgeschehens.

Sie heben den historisch dokumentierten und an der Metall-Dämmstoff-Grenzfläche experimentell bestätigten Bildungsweg nicht auf.

Angesichts der seit 1939 öffentlich dokumentierten Reaktionschemie, des Toshiba-Präventionsansatzes von 2010 und des Grenzflächennachweises von 2015 stellt sich die Frage, warum der Bildungsweg in Produktinformationen und Warnungen bis heute als offen oder nicht nachvollziehbar dargestellt wird.

Aus chromatexpertischer Sicht kann ein mangelndes Interesse von Dämmstoff- und Motorenherstellern an einer klaren Darstellung der materialbedingten Ursache und ihrer präventiven Beseitigung fachlich benannt werden, soweit dies an den dokumentierten Informationslücken festgemacht wird. Eine möglichst unklare Darstellung kann wirtschaftlichen Interessen entgegenkommen. Diese Bewertung betrifft die erkennbare Kommunikation und ihre Wirkung; eine konkrete interne Absicht ist damit nicht als feststehende Tatsache behauptet.

Die vertieften Quellen ermöglichen konkrete Rückfragen: Wurde bei Kompatibilitätsprüfungen mit Chrom nur die Dämmstoffbeständigkeit untersucht oder auch Cr(VI) bestimmt? Wurde die bekannte Metall-Dämmstoff-Reaktion in die vorgesehenen Einsatzbedingungen aufgenommen? Warum fehlen entsprechende Hinweise in bestimmten produktspezifischen Unterlagen? Welche Änderungen an Warnungen, Materialien oder Kontaktflächen folgten auf eigene Befunde? Die Antworten lassen sich an Prüfberichten, Versionshistorien und Verteilern festmachen.

### Verbrennungsrückstände und Forschungsweitergabe

Wird bei Aschen nur Gesamtchrom oder auch Cr(VI) bestimmt? Erfasst die Probenahme auch die auf dem Rost verbliebenen Aschereste und Feuerraumrückstände vor und nach dem Abfahren sowie die für Revision und Reinigung relevanten Ablagerungen? Welche Veränderungen entstehen durch die Temperatur-/Sauerstoffhistorie beim Herunterfahren, thermische Nachbehandlung oder Alterung? Wird die Entsorgungs-/Eluatbewertung mit einer Bewertung inhalativer, dermalen und oraler Exposition verwechselt? Welche Ergebnisse aus industrienahen Forschungsprojekten wurden in Warnungen und Arbeitsanweisungen übertragen?

Der sachliche Kern ist eine mögliche Umsetzungslücke zwischen verfügbarem Stoffwissen, anwendungsbezogener Information und gelebtem Schutz. Die vorhandenen Quellen und die Feldbeobachtungen begründen eine gezielte Prüfung dieser Schnittstellen. Eine Absicht des Verschweigens oder ein Fehlverhalten sämtlicher Betreiber wird daraus nicht als Tatsache abgeleitet.

## 29. Rechtsfolgen bei Nichteinhaltung

Die bisherigen Abschnitte behandeln den Bildungsweg, die Beleglage und die Pflichten. Dieser Abschnitt behandelt, was geschieht, wenn diese Pflichten nicht erfüllt werden. Die Darstellung beschränkt sich auf geltendes Recht und nennt zu jeder Aussage die Fundstelle. Maßgeblich ist, dass in allen vier dargestellten Rechtsordnungen die Sanktion an die unterlassene Pflicht anknüpft und nicht an einen eingetretenen Gesundheitsschaden.

### Deutschland: Ordnungswidrigkeit, Straftat und Rückgriff

Die deutsche Gefahrstoffverordnung führt die Verstöße gegen ihre zentralen Pflichten in § 22 Absatz 1 auf. Die Vorschrift lautet einleitend: „Ordnungswidrig im Sinne des § 26 Absatz 1 Nummer 8 Buchstabe b des Chemikaliengesetzes handelt, wer vorsätzlich oder fahrlässig“. Für den hier behandelten Sachverhalt sind drei Nummern einschlägig. Nummer 1a erfasst die Gefährdungsbeurteilung, die entgegen § 6 Absatz 8 Satz 1 nicht, nicht richtig, nicht vollständig oder nicht rechtzeitig dokumentiert wird. Nummer 3 erfasst denjenigen, der eine Tätigkeit entgegen § 7 Absatz 1 aufnehmen lässt, also bevor die Gefährdungsbeurteilung durchgeführt und die erforderlichen Schutzmaßnahmen getroffen sind. Nummer 5 erfasst, wer die Funktion und die Wirksamkeit der technischen Schutzmaßnahmen entgegen § 7 Absatz 7 Satz 1 nicht oder nicht rechtzeitig überprüft [103].

Der Bußgeldrahmen ergibt sich nicht aus der Verordnung selbst, sondern aus dem Chemikaliengesetz. § 26 Absatz 3 staffelt die Höchstbeträge; für Verstöße nach § 26 Absatz 1 Nummer 8 Buchstabe b, also für die Vorschriften zum Schutz der Beschäftigten, beträgt die Geldbuße bis zu 50.000 Euro [104].

Oberhalb der Ordnungswidrigkeit beginnt das Strafrecht, und zwar ohne dass ein Schaden eingetreten sein muss. § 22 Absatz 2 der Gefahrstoffverordnung bestimmt: „Wer durch eine in Absatz 1 bezeichnete Handlung das Leben oder die Gesundheit eines anderen oder fremde Sachen von bedeutendem Wert gefährdet, ist nach § 27 Absatz 2 bis 4 des Chemikaliengesetzes strafbar.“ [103] § 27 Absatz 2 des Chemikaliengesetzes sieht für die vorsätzliche Gefährdung Freiheitsstrafe bis zu fünf Jahren oder Geldstrafe vor, Absatz 4 für fahrlässiges Handeln Freiheitsstrafe bis zu zwei Jahren oder Geldstrafe. Der Versuch ist nach Absatz 3 strafbar. Tatbestandsmerkmal ist die Gefährdung von Leben oder Gesundheit, nicht deren Verletzung [105].

Diese Konstruktion ist für den hier behandelten Sachverhalt von erheblicher Bedeutung. Eine Berufskrankheit durch Chrom(VI) tritt mit einer Latenz von Jahren bis Jahrzehnten auf. Ein Straftatbestand, der den eingetretenen Schaden voraussetzen würde, liefe über diesen Zeitraum praktisch leer. Der Gefährdungstatbestand greift dagegen zu dem Zeitpunkt, zu dem die Tätigkeit ohne Beurteilung und ohne Schutzmaßnahmen ausgeführt wird.

Hinzu kommt der Rückgriff des Unfallversicherungsträgers. Nach § 110 des Siebten Buches Sozialgesetzbuch haften Personen, deren Haftung nach den §§ 104 bis 107 beschränkt ist, den Sozialversicherungsträgern für die infolge des Versicherungsfalls entstandenen Aufwendungen, wenn sie den Versicherungsfall „vorsätzlich oder grob fahrlässig herbeigeführt“ haben. Das Verschulden muss sich nur auf das Tun oder Unterlassen beziehen, das den Versicherungsfall verursacht hat. Die Haftung ist der Höhe nach auf den zivilrechtlichen Schadenersatzanspruch begrenzt; statt einer Rente kann der Kapitalwert verlangt werden. Der Träger kann nach billigem Ermessen ganz oder teilweise auf den Anspruch verzichten [106]. Bei einer anerkannten Berufskrankheit mit langjähriger Renten-, Behandlungs- und Rehabilitationslast ist dieser Rückgriff wirtschaftlich regelmäßig der größte Posten, und er trifft denjenigen, dessen Haftung gegenüber dem Beschäftigten selbst beschränkt ist.

Auf der Umweltseite greift § 326 Absatz 1 des Strafgesetzbuchs. Erfasst ist, wer Abfälle außerhalb einer dafür zugelassenen Anlage oder unter wesentlicher Abweichung von einem vorgeschriebenen oder zugelassenen Verfahren sammelt, befördert, behandelt, verwertet, lagert, ablagert, ablässt, beseitigt oder damit handelt, sofern die Abfälle einer der aufgeführten Gefahrenkategorien unterfallen. Dazu gehören Abfälle, die „für den Menschen krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend oder erbgutverändernd sind“. Der Strafraum beträgt bis zu fünf Jahre Freiheitsstrafe oder Geldstrafe, bei fahrlässigem Handeln nach Absatz 5 Nummer 1 bis zu drei Jahre [107]. Chromathaltige Dämmstoffe, Ablagerungen und Aschen fallen in diese Betrachtung, sobald sie als Abfall gehandhabt werden; die Einstufung folgt dabei nicht aus dem Lieferzustand, sondern aus dem Gebrauchszustand.

### Niederlande: Substitutionspflicht, bestuurlijke boete und Wirtschaftsdelikt

Das niederländische Arbeidsomstandighedenbesluit regelt die Tätigkeiten mit krebserzeugenden Stoffen in Kapitel 4 Abschnitt 2. Artikel 4.17 trägt die Überschrift „Voorkomen van blootstelling; vervangen“ und verlangt technische und organisatorische Maßnahmen, die die Möglichkeit einer Exposition so weit wie möglich an der Quelle verhindern, und zwar vor allem durch Ersatz der krebserzeugenden, erbgutverändernden oder fortpflanzungsgefährdenden Stoffe oder Verfahren, „voor zover dit technisch uitvoerbaar is“, durch Stoffe oder Verfahren, bei denen die Beschäftigten nicht oder weniger gefährdet werden [109]. Der Vorrang der Substitution ist damit wie im deutschen Recht formuliert, allerdings mit dem Maßstab der technischen Durchführbarkeit.

Die Nichteinhaltung der Pflichten aus der Arbeidsomstandighedenwet und der darauf beruhenden Vorschriften ist nach Artikel 33 Absatz 1 und 2 eine overtreding. Artikel 34 Absatz 1 weist die Verhängung der bestuurlijke boete einem dafür bestimmten Beamten zu. Nach Artikel 34 Absatz 3 beträgt die Geldbuße höchstens den Betrag der fünften Kategorie nach Artikel 23 Absatz 4 des niederländischen Strafgesetzbuchs [108]; dieser Betrag liegt seit dem 1. Januar 2026 bei 110.000 Euro, der Betrag der sechsten Kategorie bei 1.100.000 Euro [111]. Bei einem gleichartigen Verstoß innerhalb der vorangegangenen fünf Jahre erhöht sich die Geldbuße nach Artikel 34 Absatz 5 um 100 Prozent, bei zwei früheren Verstößen oder bei als schwer eingestuften Verstößen nach den Absätzen 6 und 7 um 200 Prozent; bei schweren Verstößen verlängert Absatz 9 den Betrachtungszeitraum auf zehn Jahre [108].

Die Strafvorschrift steht in Artikel 32 der Arbeidsomstandighedenwet: „Het is de werkgever verboden handelingen te verrichten of na te laten in strijd met deze wet of de daarop berustende bepalingen indien daardoor, naar hij weet of redelijkerwijs moet weten, levensgevaar of ernstige schade aan de gezondheid van een of meer werknemers ontstaat of te verwachten is.“ [108] Der Maßstab ist damit nicht die positive Kenntnis allein, sondern auch das, was der Arbeitgeber vernünftigerweise wissen muss. Artikel 1 Nummer 1 der Wet op de economische delicten führt Artikel 32 der Arbeidsomstandighedenwet ausdrücklich als Wirtschaftsdelikt auf. Nach Artikel 2 Absatz 1 derselben Wet sind diese Delikte misdrijven, soweit sie vorsätzlich begangen werden, andernfalls overtredingen. Artikel 6 Absatz 1 Nummer 1 sieht für das vorsätzlich begangene Delikt Freiheitsstrafe bis zu sechs Jahren, Arbeitsstrafe oder Geldstrafe der fünften Kategorie vor, Nummer 4 für die overtreding Haft bis zu einem Jahr, Arbeitsstrafe oder Geldstrafe der vierten Kategorie [110].

### Vereinigtes Königreich: COSHH und der Health and Safety at Work etc. Act

Regulation 7(1) der Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 bestimmt: „Every employer shall ensure that the exposure of his employees to substances hazardous to health is either prevented or, where this is not reasonably practicable, adequately controlled.“ Regulation 7(2) stellt den Vorrang der Substitution klar: „substitution shall by preference be undertaken“, wobei der Arbeitgeber die Verwendung des gefährlichen Stoffes so weit vernünftigerweise praktikabel durch einen Stoff oder ein Verfahren ersetzt, das die Gefährdung beseitigt oder verringert. Ist die Verhinderung der Exposition gegenüber einem Karzinogen nicht vernünftigerweise praktikabel, verlangt Regulation 7(5) zusätzlich die vollständige Einhausung von Prozess und Handhabungssystemen, soweit praktikabel, das Verbot von Essen, Trinken und Rauchen in möglicherweise kontaminierten Bereichen, die regelmäßige und anlassbezogene Reinigung von Böden, Wänden und sonstigen Oberflächen, die Kennzeichnung der betroffenen Bereiche und Anlagen mit geeigneten Warnzeichen sowie sicheres Lagern, Handhaben und Entsorgen in geschlossenen und eindeutig gekennzeichneten Behältern [113].

Diese Pflichten sind strafbewehrt. Nach Section 33(1)(c) des Health and Safety at Work etc. Act 1974 ist es eine Straftat, gegen health and safety regulations oder gegen eine daraufhin ergangene Anordnung zu verstoßen. Section 33(2) verweist für Verfahrensart und Höchststrafe auf Schedule 3A. Dort ist die Tat nach Section 33(1)(c) wahlweise im summarischen Verfahren oder im Anklageverfahren verfolgbar; im Anklageverfahren beträgt die Höchststrafe Freiheitsstrafe bis zu zwei Jahren, Geldstrafe oder beides, im summarischen Verfahren Freiheitsstrafe bis zur allgemeinen Obergrenze des Magistrates Court, Geldstrafe oder beides. Die früher geltende summarische Obergrenze von 20.000 Pfund ist entfallen; der geltende Wortlaut nennt nur noch „a fine“ [112]. Auch hier setzt die Strafbarkeit keinen eingetretenen Gesundheitsschaden voraus, sondern knüpft an den Regelverstoß an.

### Vereinigte Staaten: OSHA-Bußgelder, Strafvorschrift und Beschaffungsrecht

In den Vereinigten Staaten gilt für Chrom(VI) der Standard 29 CFR 1910.1026 mit einem zulässigen Expositionswert von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und einem Action Level von  $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Abschnitt 18). Die zivilen Geldbußen nach Section 17 des Occupational Safety and Health Act werden jährlich an die Inflation angepasst. Für Festsetzungen nach dem 15. Januar 2026 betragen sie bis zu 16.550 US-Dollar je Verstoß bei serious und other-than-serious violations sowie bei Verstößen gegen Aushangpflichten, bis zu 16.550 US-Dollar je Tag bei Nichtbeseitigung nach Ablauf der gesetzten Frist und bis zu 165.514 US-Dollar je Verstoß bei willful oder repeated violations [114]. Da jede betroffene Position einzeln zitiert werden kann, ist der Gesamtbetrag durch diese Einzelbeträge nicht begrenzt.

Hinzu tritt die Strafvorschrift in Section 17(e): Ein Arbeitgeber, der vorsätzlich gegen einen nach Section 6 erlassenen Standard verstößt und dadurch den Tod eines Beschäftigten verursacht, wird mit Geldstrafe bis zu 10.000 US-Dollar oder mit Freiheitsstrafe bis zu sechs Monaten oder mit beidem bestraft; nach einer ersten Verurteilung erhöht sich der Rahmen auf 20.000 US-Dollar oder ein Jahr [114]. Im Beschaffungsrecht kommt die in Abschnitt 18 dargestellte Klausel DFARS 252.223-7008 hinzu, die an die Lieferung anknüpft und nicht an die Exposition.

### Was die vier Rechtsordnungen gemeinsam haben

Die Anknüpfungspunkte liegen übereinstimmend vor dem Schaden. Deutschland sanktioniert die fehlende Dokumentation, die Aufnahme der Tätigkeit ohne Beurteilung und die unterlassene Wirksamkeitsprüfung und stellt die Gefährdung von Leben oder Gesundheit unter Strafe. Die Niederlande ahnden die Nichteinhaltung der Pflichten mit einer Geldbuße und stellen das Handeln oder Unterlassen unter Strafe, von dem der Arbeitgeber weiß oder vernünftigerweise wissen muss, dass daraus Lebensgefahr oder ernster Gesundheitsschaden entsteht oder zu erwarten ist. Das Vereinigte Königreich knüpft an den Verstoß gegen die Regulations an. Die Vereinigten Staaten knüpfen an den Verstoß gegen den Standard an und erhöhen den Rahmen bei Vorsatz und Wiederholung.

Für den hier behandelten Sachverhalt folgt daraus eine klare Beweislage. Da die Schutzmaßnahmen nach der deutschen TRGS 561 bereits greifen, wenn eine Chrom(VI)-Belastung nicht auszuschließen ist (Abschnitt 6), und da ein negatives Messergebnis ohne Angabe der Wiederfindung an derselben Matrix keine Aussage über den Gehalt zulässt (Abschnitt 17), entscheidet im Streitfall nicht die Messung, sondern die Dokumentation: ob eine Gefährdungsbeurteilung vorliegt, die die Materialpaarung aus chromlegiertem Heißeil und basischem Dämmstoff erfasst, ob die Substitutionsprüfung durchgeführt und begründet wurde und ob die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen überprüft worden ist.

Eine fehlende oder unzutreffende Bewertung einer Chrom(VI)-Exposition ist damit in keiner der vier Rechtsordnungen eine Randfrage der Betriebsorganisation. Sie ist bußgeldbewehrt, im oberen Bereich strafbewehrt und löst im Schadensfall den Rückgriff des Sozialversicherungsträgers aus.

## 30. Schlussfolgerung

---

### Grundlagen und Isoliertechnik

Calcium- und Natriumchromat sind unter basisch-oxidierenden thermischen Bedingungen gezielt bildbare Chrom(VI)-Verbindungen. Die historische Patentschrift und die experimentellen Grenzflächenbefunde begründen einen vorhersehbaren, bei der Materialauswahl und Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigenden Stoffumwandlungsprozess.

Der systemische Fehler liegt dort, wo Wärmedämmleistung, Faserverhalten und Lieferzustand als ausreichende Sicherheitsbewertung behandelt werden, während die Gefahrstoffentstehung in situ während des Betriebs unzureichend berücksichtigt wird. Basische Oxidanteile begründen einen Gefährdungshinweis; Schutz und Prävention dürfen weder allein an Luftwerten noch an sichtbaren Ablagerungen oder positiven Schnelltests ausgerichtet werden.

Gasphasentransport und calcium-/natriumabhängige Chromatbildung ergänzen sich. Toshiba untersucht Prävention; der EC FIA-Auftrag zeigt, dass die Frage im europäischen Herstellerverband bekannt war. [11, 26, 35-38]

### **Fahrzeuge**

Fahrzeugkontamination betrifft zudem Handhabung, Wartung, dauerhafte Abhilfe und Eigentümerkosten. Kaufrechtliche Mängelansprüche und sicherheitsrechtliche Herstellermaßnahmen bieten in der EU eigene Prüfwege. [22, 23, 46, 47]

### **Verbrennungsrückstände**

Verbrennungsrückstände einschließlich Rostasche, Abfahrphase und Kremationsasche erweitern die Bewertung auf Betrieb, Revision und Umweltpfade. Die Umsetzung des dokumentierten Wissens in Analytik, Schutz und Information ist zu prüfen. [30-34, 43-45]

## Nachwort des Autors

Die Aussage, dass Calciumoxid an der Entstehung krebserzeugender Chromate beteiligt ist, klingt zunächst unverhältnismäßig. Ein Stoff, der in der Dämmtechnik als selbstverständlicher Bestandteil gilt und in keiner Krebsbetrachtung vorkommt, soll die Ursache eines Befundes sein, der ganze Anlagenbestände betrifft. Wer das zum ersten Mal hört, darf skeptisch sein. Thermodynamisch beschrieben und experimentell bestätigt ist der Vorgang allerdings seit Jahrzehnten, und die Belege dafür stehen in dieser Expertise.

Mir selbst ging es 2019 nicht anders. Ich hatte die Zusammensetzungen von Glasgeweben, Mineral- und Basaltwollen jahrzehntelang dokumentiert und die Frage nach dem Calcium als Reaktionspartner dennoch nie gestellt. Keiner meiner Lieferanten konnte sie damals beantworten. Erst aus Patentliteratur, Grenzflächenuntersuchungen, Herstellerunterlagen und eigenen Feldbefunden ergab sich, worum es geht und welchen Umfang die Sache hat.

Die praktische Konsequenz dieser Darstellung ist erheblich. Calciumoxidhaltige Dämmstoffe sind in der Hochtemperaturtechnik Standard und liegen an Kesseln, Turbinen, Motoren, Abgasanlagen, Schiffsantrieben und Baumaschinen. Eine belastbare Mengenangabe gibt es nicht, weil dieser Bestand nie unter der Fragestellung der Chromatbildung erfasst wurde. Solange der betroffene Anteil nicht eingegrenzt ist, lässt sich auch nicht priorisieren.

Ich verstehe auch die Zurückhaltung, die ich bei heutigen Dämmstoffherstellern wahrnehme, die Problematik anzusprechen und zu kommunizieren. Und ich kann mir als langjähriger Lieferant das Dilemma der Motoren- und Turbinenhersteller sowie der mit ihnen arbeitenden Isolierbetriebe vorstellen.

Ich weiß ebenso, wie es in einer Abfallverbrennungsanlage, an einem Blockheizkraftwerk, im Kraftwerksbetrieb oder in einem Maschinenraum zu Spannungen kommt, wenn Schutzmaßnahmen eingeführt werden, die den eingeübten Arbeitsablauf verändern. Sie treffen Menschen, die ihre Arbeit über Jahre ohne Beanstandung ausgeführt haben, und sie werfen zugleich die Frage nach der zurückliegenden Exposition auf.

Keiner dieser Punkte ändert etwas an der Sache. Sie sollten uns nicht davon abhalten, die Sicherheit für Mensch und Umwelt weiter zu verfolgen und die erforderlichen Maßnahmen einzuleiten. Wir haben schon einmal, auch in den hier besprochenen Bereichen, viel zu lange weggeschaut. Wie eingangs angedeutet: Möge sich Geschichte nicht wiederholen.

Markus Sommer

## Quellen

1. Udy, Marvin J.: Chrome Alloy Making, US-Patent 2,176,687; Anmeldung 22. Januar 1938, Erteilung 17. Oktober 1939. Relevante Stellen: Beschreibung, gedruckte Seiten 2-3; Ansprüche 22-26, gedruckte Seite 7. Patentkopie [Quelle](#)
2. BG ETEM: Mögliche Chrom(VI)-Exposition, zuletzt geändert am 3. August 2026. [Quelle](#)
3. Europäische Chemikalienagentur (ECHA): Calcium chromate: ECHA CHEM und Sodium chromate: ECHA CHEM; Einstufung und Kennzeichnung sind verbindlich anhand der jeweils geltenden Tabelle 3 des Anhangs VI der CLP-Verordnung zu prüfen. [Quelle](#)
4. Walter, M.; Schenkeveld, W. D. C.; Tomatis, M. et al.: The Potential Contribution of Hexavalent Chromium to the Carcinogenicity of Chrysotile Asbestos. Chemical Research in Toxicology 2022, 35, 2335-2347. DOI: 10.1021/acschemrestox.2c00314. Vorgelegte Studie [Quelle](#)
5. Passeron, J.; Maisant, S.; Patrascu, C. et al.: Évaluation par mesures atmosphériques, surfaciques et biologiques de l'exposition professionnelle au chrome VI via une équipe référente en toxicologie en SPST. Références en Santé au Travail, TF 329, September 2025. Vorgelegte Studie [Quelle](#)
6. Johns-Manville: Historisches Produktblatt „Johns-Manville Insulations for Heating and Plumbing Service“, mit „J-M Thermobestos“ als „calcium silicate insulation“ bis 1.200 °F; vorgelegte Abbildung. Ergänzend zur heutigen Produktklasse: Johns Manville Thermo-1200: Calcium Silicate Insulation. [Quelle](#)
7. Kelly, George: Insulating and Fireproof Sheeting, US-Patent 668,684, Anmeldung 4. August 1900, Erteilung 26. Februar 1901. Patenttext. [Quelle](#)
8. Virta, R. L.: Asbestos Geology, Mineralogy, Mining, and Uses. U.S. Geological Survey, Open-File Report 02-149, 2002, Tabelle zu Asbestfasermischungen mit anorganischen Materialien, einschließlich hydriertem Calciumsilikat. USGS-Bericht. [Quelle](#)
9. Verbinnen, B.; Billen, P.; Van Coninckxloo, M.; Vandecasteele, C.: Heating Temperature Dependence of Cr(III) Oxidation in the Presence of Alkali and Alkaline Earth Salts and Subsequent Cr(VI) Leaching Behavior. Environmental Science & Technology 2013, 47, 5858-5863. DOI: 10.1021/es4001455. Vorgelegte Studie [Quelle](#)
10. Mao, L.; Gao, B.; Deng, N. et al.: The role of temperature on Cr(VI) formation and reduction during heating of chromium-containing sludge in the presence of CaO. Chemosphere 2015, 138, 197-204. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.097. Vorgelegte Studie [Quelle](#)
11. Sayano, A.; Kanno, H.; Inagaki, S.; Takahashi, M.; Yoshida, M.: The formation of Cr(VI) compound at the interface between metal and heat-insulating material and the approach to prevent the formation by sol-gel process. Journal of the Ceramic Society of Japan 2015, 123, 677-684. DOI: 10.2109/jcersj2.123.677. Vorgelegte Studie [Quelle](#)
12. Caterpillar: Hexavalent Chromium has been detected in certain Caterpillar Engines, Technical Information Bulletin MO116139-01, 1. Juni 2020; vorgelegte französische Übersetzung. Vorgelegtes Bulletin
13. Caterpillar Energy Solutions GmbH / Zeppelin: Technisches Rundschreiben 2175/00 DE: Sechswertiges Chrom (Cr6, CrVI), 23. August 2021. Vorgelegtes Rundschreiben
14. MAN Truck & Bus SE: Service-Mitteilung 8339SM: Auftreten von hexavalenten Chrom-Cr(VI)-Verbindungen im Betrieb, 13. Dezember 2023. Vorgelegte Service-Mitteilung
15. Frenzelit GmbH: TechInfo 28 Chromium(VI)-Formation at High Temperature, Status August 2025, V2-ABE-MSK/0825/de. Vorgelegte englische Fassung.
16. Rockwool Technical Insulation: Hinweise zur sicheren Verwendung: ProRox WM Drahtnetzmatte mit Edelstahl-Drahtgeflecht (SW) und/oder Edelstahl-Steppfaden (S), Version 1, 1. Mai 2023. Vorgelegte Produktinformation
17. Sullivan, Ralph J.: Air Pollution Aspects of Chromium and its Compounds. Litton Systems für National Air Pollution Control Administration, US Department of Health, Education, and Welfare, September 1969; gedruckte Seiten 24-25, Abschnitte 3.4.1 und 3.4.3. Heute im EPA-Archiv. [Quelle](#)
18. Richtlinie 2004/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004, in geänderter Fassung; Artikel 3 Absätze 2 und 3 (Gefährdungsbewertung und Expositionswege) [Quelle](#)
19. TRGS 561: Tätigkeiten mit krebserzeugenden Metallen und ihren Verbindungen, Fassung 4. Mai 2026; Abschnitte 3.3.4 und 5.9.3 sowie 4.1/4.2. Amtliche Veröffentlichung bzw. Behördenkopie. [Quelle](#)
20. Rinehart, Harry H. / Johns-Manville: Thermal insulation and method of manufacture. US2389460A; Anmeldung 5. März 1943, Erteilung 20. November 1945; insbesondere Anspruch 5 (Steinwolle und Asbest im Verhältnis etwa 2:1) [Quelle](#)

21. Radabaugh, Noah B.: Plastic compound. US2162387A; Anmeldung 18. Februar 1937, Erteilung 13. Juni 1939; Rezeptur und Anspruch 1 (Hochtemperaturzement mit Asbest, Mineralwolle und Natriumsilikat). [Quelle](#)
22. [REDACTED]: Service Information: Work on component parts conducting exhaust gas with chrome(VI). [REDACTED], 7. August 2025. Vorgelegte Service-Information, eine Seite.
23. [REDACTED]: Chromium VI Safety Information. Aftersales Bulletin [REDACTED], 27. August 2025, drei Seiten. Vorgelegte Fassung; interne Kennzeichnung SECRET.
24. Rockwool B.V. / Technical Insulation: Safe Use Instruction Sheet: ProRox WM versions with stainless steel mesh and/or stitching wire. Ausgabe 1. Januar 2025, Version 1.1; Abschnitte 2.3 und 8; Vergleich zur vorgelegten Fassung 2023. Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
25. [REDACTED]: Technical Instruction: Cr6-Reduction, [REDACTED], Index 1, Freigabe 31. Mai 2023; insbesondere Kapitel 2 und Adressatenübersicht. Vorgelegte Unterlage, sieben Seiten.
26. Toshiba Corp.: Thermal apparatus structural member, and method of manufacturing the same. JP2011232021A, Priorität 8. April 2010, Veröffentlichung 17. November 2011; Beschreibung, Stand der Technik und Präventionsansatz. Japanische Patentfamilie; englische maschinelle Übersetzung auf Google Patents Vorgelegte Übersetzung zusätzlich mit dem japanischen Original abgeglichen, insbesondere Beispiel 1 und Vergleichsbeispiele. [Quelle](#)
27. Morgan Thermal Ceramics Superwool Technical Manual, Contamination / Pollution Study, gedruckte Seiten 65-68. Offizieller vierseitiger Auszug; Dateiname I3\_contamination\_pollution\_study\_sept\_14.pdf. Im Auszug keine eindeutig datierte Veröffentlichung. Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
28. Morgan / U.K. Thermal Ceramics Ltd.: SDS 418, Superwool HT C.T. / HTG VF, letzte Revision 1. Juni 2025; insbesondere Abschnitte 1, 3, 10 und 16. EU-Regelwerk; sieben Seiten. Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
29. Aspen Aerogels Pyrogel XTE, deutsche Artikelinformation (AIS), Ausgabedatum 2. Januar 2024; insbesondere Abschnitt 10. Sieben Seiten. Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
30. Euro Environmental Ltd.: Managing Chromium VI Exposure in Waste Recycling Incinerators. Undatierter britischer Praxisfallbericht; Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
31. Hu, H. et al.: Mechanism of chromium oxidation by alkali and alkaline earth metals during municipal solid waste incineration. Proceedings of the Combustion Institute 35 (2015), 2397-2403. DOI: 10.1016/j.proci.2014.08.029. Ausgewertet: Verlagsabstract. [Quelle](#)
32. Hu, H. et al.: Fate of chromium during thermal treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. Proceedings of the Combustion Institute 34 (2013). DOI: 10.1016/j.proci.2012.06.181. Ausgewertet: Verlagsabstract. [Quelle](#)
33. Gong et al.: Solidification and Biotoxicity Assessment of Thermally Treated Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Fly Ash. International Journal of Environmental Research and Public Health 14 (2017), 626. DOI: 10.3390/ijerph14060626. Volltext. [Quelle](#)
34. Europäische Kommission / JRC: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019, JRC118637. Ausgewertete amtlich indexierte Fundstelle: Auslaugung von Bodenasche, ausdrückliche Nennung von hexavalent chromium. Kein vollständiger Dokumentabgleich. [Quelle](#)
35. Tatar, G. et al. / Gannon, P.: XPS Characterization of Aluminosilicate Fibers Post Interaction with Chromium Oxyhydroxide at 100-230°C. Journal of The Electrochemical Society 165 (2018), C624-C632. DOI: 10.1149/2.0801810jes. Vorgelegter Volltext. [Quelle](#)
36. van Leeuwen, T. K. et al.: Reactive Condensation of Cr Vapor on Aluminosilicates Containing Alkaline Oxides Journal of The Electrochemical Society 171 (2024), 091501, veröffentlicht 2. September 2024. DOI: 10.1149/1945-7111/ad7061. Vorgelegter Volltext; Methoden, Tabellen I/II und Modellierung getrennt ausgewertet. [Quelle](#)
37. van Leeuwen, T. K.: Condensation of Chromium Vapor, Generated in High-Temperature (>800°C) Environments, and Interactions with Aluminosilicate Surfaces. Dissertation, Montana State University, Mai 2024. Vorgelegter Volltext; insbesondere gedruckte Seiten iii und 2 (ECFIA, Finanzierung und Forschungsanlass).
38. Toshiba Corp.: Thermal equipment structure, JP2012220174A; Priorität 14. April 2011, Veröffentlichung 12. November 2012. Vorgelegte englische maschinelle Übersetzung. Abgleich der Versuchspassagen mit der japanischen erteilten Fassung JP5774355B2, 9. September 2015. Insbesondere Beispiel 1 und Vergleichsbeispiel 1. [Quelle](#)
39. Speer, R. M. et al.: Particulate hexavalent chromium alters microRNAs in human lung cells that target key carcinogenic pathways. Toxicology and Applied Pharmacology 438 (2022), 115890. DOI: 10.1016/j.taap.2022.115890. Vorgelegtes Autorenmanuskript; Versuche mit Zinkchromat. [Quelle](#)
40. Health and Safety Executive (Großbritannien): Waste management: Disposal and energy recovery. Offizielle Hinweise zu Flugasche und Staubexposition; Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
41. Health and Safety Executive (Großbritannien): COSHH: Workplace exposure limits. Alle Aufnahmewege und Minimierung bei krebserzeugenden Stoffen; offizielle Onlinefassung, Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)

42. Health and Safety Executive (Großbritannien): EH40/2005 Workplace exposure limits, vierte Ausgabe 2020, Tabelle 2: Biological monitoring guidance values; Chromium im Urin. Hier für die Einordnung des Biomonitorings verwendet, nicht für einen EU-Grenzwertvergleich. [Quelle](#)
43. Leaching behavior of heat-treated waste ash. Fuel 85(3) (2006), 401-409. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.07.016. Ausgewertet: Verlagsabstract und zugängliche Abschnitte Samples, Leaching behavior und Conclusion; Bodenaschen zweier kommunaler Rostfeuerungsanlagen in Japan. Kein vollständiger Volltextabgleich. [Quelle](#)
44. Haas, J. / Schack-Kirchner, H. / Lang, F.: Evaluierung von Ausmaß und Ursachen einer Schadstofffreisetzung aus Urnen in Bestattungswäldern. Umweltbundesamt TEXTE 142/2019. Insbesondere Modellaschen/Extraktion sowie Seite 72: Sauerstoffkontakt, inerte Nachbehandlung und Verweis auf Brill (2002). [Quelle](#)
45. Ferreira, M. J. / Almeida, M. F. / Pinto, T.: Influence of temperature and holding time on hexavalent chromium formation during leather combustion. Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists 88 (1999), 135-138. Porto-Nachweis. 10216/21130. Ausgewertet: Verlagsabstract; Verbrennung von Lederresten. [Quelle](#)
46. Richtlinie (EU) 2019/771 über bestimmte vertragsrechtliche Aspekte des Warenkaufs; konsolidierte Fassung 31. Juli 2026. Art. 7, 10, 13 und 14: Sicherheit, Haftung und Abhilfen im Verbraucherkauf. Ausgewertet: amtlich indexierte EUR-Lex-Fundstellen; nationale Umsetzung und konkrete Anspruchsvoraussetzungen gesondert zuzuordnen. [Quelle](#)
47. Verordnung (EU) 2018/858 über Genehmigung und Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen; konsolidierte Fassung 2. August 2026. Insbesondere Art. 13/14: Herstellerpflichten, Nichtkonformität und ernstes Risiko. Ausgewertet: amtlich indexierte EUR-Lex-Fundstellen; keine Cr(VI)-spezifische Fallentscheidung. [Quelle](#)
48. Morgan Advanced Materials / Thermal Ceramics: Superwool Plus Heat Shield, Product Data Sheet, 09/2019, drei Seiten. Insbesondere Seiten 1-2: Automotive-Anwendung, Oxidzusammensetzung, heiße Oberflächentemperaturen und Fasersicherheitsdarstellung; Seite 3: europäische Verfügbarkeitstabelle. [Quelle](#)
49. Morgan Thermal Ceramics Heat Shields: Transportation & Industrial Heat Shield, offizielle Systemseite, Abruf 7. Oktober 2026. Shell Technology und Integrated Technology: Superwool Plus, Edelstahlkapselung und ausdrücklich genannte automobile Heißeilanwendungen. [Quelle](#)
50. Paoletti, Francesca: Behavior of oxyanions forming heavy metals in municipal solid waste incineration. Dissertation Universität Stuttgart; Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6755, 2002. Insbesondere Zusammenfassung S. II und V, S. 39-41, Tabelle 6.3 (S. 78). [Quelle](#)
51. Vehlow, J.; Paoletti, F.; Seifert, H.; Sirini, P.: Behaviour of oxyanions forming heavy metals in waste combustion. WTER Fall Meeting, Columbia University, New York, 7./8. Oktober 2004. [Quelle](#)
52. [REDACTED]: Herstellerkorrespondenz an den Verfasser zu Chrom(VI)-Ablagerungen an Abgasisolierungen, August 2019. Liegt dem Verfasser vor.
53. International Agency for Research on Cancer (IARC): Chromium (VI) Compounds. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 100C: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts, Lyon 2012; insbesondere Abschnitte 4 und 6. [Quelle](#)
54. US OSHA: Occupational Exposure to Hexavalent Chromium; Final Rule. Federal Register Vol. 71, No. 39, 28. Februar 2006; Risikobewertung auf Basis der Kohorten Gibb et al. (2000, Baltimore) und Luippold et al. (2003, Painesville). [Quelle](#)
55. Levy, L. S.; Martin, P. A.; Bidstrup, P. L.: Investigation of the potential carcinogenicity of a range of chromium containing materials on rat lung. British Journal of Industrial Medicine 43(4) (1986), 243 ff. [Quelle](#)
56. US OSHA: Hexavalent Chromium, Health Effects. Offizielle Onlinefassung, Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
57. California Regional Water Quality Control Board, Lahontan Region: PG&E Hinkley Chromium Cleanup, Frequently Asked Questions, Februar 2008. [Quelle](#)
58. Safe Work Australia: Workplace exposure limits for airborne contaminants, Changes between WES and WEL; Inkrafttreten 1. Dezember 2026, Wegfall der Grenzwerte für nicht schwellenwertbasierte genotoxische Karzinogene. Abruf 7. Oktober 2026. [Quelle](#)
59. European Chemicals Agency (ECHA): Beschränkungsvorschlag nach Anhang XV REACH für Chrom(VI)-Stoffe, April 2025; hier nach der Zusammenfassung der CIRS Group. [Quelle](#)
60. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), Artikel 3 Nummer 24, Begriffsbestimmung „Verwendung“. [Quelle](#)
61. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA): Scientific Opinion on Dietary Reference Values for chromium. EFSA Journal 2014;12(10):3845. [Quelle](#)
62. Richtlinie 2009/148/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Asbest am Arbeitsplatz; Artikel 2 (Aktinolith, Amosit, Anthophyllit, Chrysotil, Krokydolith, Tremolit). [Quelle](#)

63. Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP), Anhang VI Teil 3: Index 024-017-00-8 (Chrom(VI)-Verbindungen mit Ausnahme von Bariumchromat und gesondert aufgeführten Verbindungen), 024-008-00-9 (Calciumchromat), 024-018-00-3 (Natriumchromat). [Quelle](#)
64. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST, Spanien): Infocarquim, Cromato de calcio; harmonisierte Einstufung Carc. 1B, H350, H302, H400, H410; Index 024-008-00-9; nicht zulassungspflichtig. Abruf 8. Oktober 2026. [Quelle](#)
65. INSST: Infocarquim, Cromato de sodio; harmonisierte Einstufung Carc. 1B, Muta. 1B, Repr. 1B, H330, H301, H312, H372, H314, H334, H317, H400, H410; Index 024-018-00-3; zulassungspflichtig. Abruf 8. Oktober 2026. [Quelle](#)
66. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH); Artikel 2 Absatz 2, Artikel 3 Nummer 3, Artikel 57 Buchstabe a, Anhang XIV Eintrag 22 (Natriumchromat), Anhang XVII Eintrag 6 (Asbestfasern). [Quelle](#)
67. Kandidatenliste der besonders besorgniserregenden Stoffe (SVHC), abgeglichen anhand der Zusammenstellung „REACH SVHC List – 253 Substances“; Natriumchromat enthalten, Calciumchromat nicht enthalten. Abruf 8. Oktober 2026. [Quelle](#)
68. Risk & Policy Analysts (RPA): EU REACH Chromates Restriction Factsheet, Version 4, April 2025; Mandat und Ausnahme der Bleichromat-Einträge. [Quelle](#)
69. Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, Anhang III (gefahrenrelevante Eigenschaften HP 7, HP 10, HP 11) in der Fassung der Verordnung (EU) Nr. 1357/2014. [Quelle](#)
70. Beschluss 2014/955/EU zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis; Abfallschlüssel 19 01 11\* und 19 01 12. [Quelle](#)
71. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA): Chrom(VI)-Verbindungen; Aufnahmewege, Beurteilungsmaßstäbe nach TRGS 910 bezogen auf den Elementgehalt von Chrom. Abruf 8. Oktober 2026. [Quelle](#)
72. IFA: Krebserzeugende Gefahrstoffe: Regelungen zum Mutterschutz. Abruf 8. Oktober 2026. [Quelle](#)
73. Gesetz zum Schutz von Müttern bei der Arbeit, in der Ausbildung und im Studium (Mutterschutzgesetz, MuSchG), §§ 10 und 11. [Quelle](#)
74. Latitude Media: Wärtsilä to supply 282 MW onsite power solution for a U.S. data center as AI growth intensifies demand for reliable power, 5. Oktober 2026; 15 Gasmotoren Wärtsilä 50SG, Begründung mit begrenzter Netzkapazität. Abruf 8. Oktober 2026. [Quelle](#)
75. Babcock & Wilcox Power Generation Group: Plant Service Bulletin PSB-43A, Refractories, Plastics, Insulation or Textiles Containing Chromium Compounds, Fußzeilenkennung „PSB-43A 3M H 3/94“, © The Babcock & Wilcox Company, 1994; Erstfassung PSB-43, April 1990, dort im Abschnitt Purpose benannt. Vom Hersteller weiterhin veröffentlicht, abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
76. European Food Safety Authority, EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies: Scientific Opinion on Dietary Reference Values for chromium. EFSA Journal 2014;12(10):3845. [Quelle](#)
77. Morgan Advanced Materials: Safety Data Sheet SDS 257, Ceraform 130, Erstausgabe 1. September 1990, Fassung vom 23. Dezember 2020.
78. Europäische Chemikalienagentur ECHA: Registrierungsdossier Refractories, fibers, aluminosilicate, CAS-Nummer 142844-00-6.
79. Harmonisierte Einstufung von Calciumoxid (CAS 1305-78-8) nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008: Skin Irrit. 2 (H315), Eye Dam. 1 (H318), STOT SE 3 (H335); Richtgrenzwert nach Richtlinie (EU) 2017/164: 1 mg/m³ (A-Staub), Kurzzeitwert 4 mg/m³.
80. I. C. Freestone: Glass production in Late Antiquity and the Early Islamic period: a geochemical perspective. University College London, UCL Discovery. [Quelle](#)
81. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 43: Man-Made Mineral Fibres, Abschnitt 2 (Production, Use, Occurrence and Analysis). [Quelle](#)
82. Owens Corning: People & Products Making History, Owens Corning Milestones. [Quelle](#)
83. US Environmental Protection Agency: Method 3060A, Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium, SW-846, Revision 1, Dezember 1996. [Quelle](#)
84. NEN 5617:2022, Bepaling van het gehalte aan chroom(VI)-verbindingen in verf en coatings (semikwantitatief).
85. SEEF B.V., Ulvenhout (NL): Kennisbank, Beiträge zur Cr(VI)-Analytik in thermischer Isolierung und in trockener Farbe, Abruf Oktober 2026. [Quelle](#)
86. Richtlinie (EU) 2017/2398 zur Änderung der Richtlinie 2004/37/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Karzinogene oder Mutagene bei der Arbeit; verbindlicher Grenzwert für Chrom(VI)-Verbindungen. [Quelle](#)
87. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA): Chrom(VI)-Verbindungen, Beurteilungsmaßstäbe nach TRGS 910 und TRGS 561. [Quelle](#)

88. Health and Safety Executive (UK): Chromium and you, INDG346; Workplace Exposure Limit nach EH40 und COSHH Regulations 2002. [Quelle](#)
89. DFARS 252.223-7008, Prohibition of Hexavalent Chromium; vorgeschrieben nach DFARS 223.7306, Fassung nach der DFARS-Änderung vom 25. April 2024. [Quelle](#)
90. Defense Federal Acquisition Regulation Supplement: Minimizing the Use of Hexavalent Chromium (DFARS-Fall 2009-D004, RIN 0750-AG35), Schlussregel vom 5. Mai 2011, Federal Register Band 76 Nr. 87; verweist auf das Memorandum des Under Secretary of Defense (Acquisition, Technology and Logistics) vom 8. April 2009. [Quelle](#)
91. De Laet, R.; van de Grift, F. (SEEF B.V., Ulvenhout, Niederlande): WD-40 as a purported Cr(VI) neutralizer: experimental refutation and mechanistic explanation. Technische Veröffentlichung, September 2026; Versuchsprotokolle als interne Dokumentation.
92. Energy UK, London: Hexavalent Chromium Safety Bulletin Summary, September 2019; Zusammenfassung der an die britische Stromerzeugungsbranche gegebenen Sicherheitsmitteilungen für das Generation Health and Safety Forum.
93. HarbisonWalker International, Moon Township, Pennsylvania: Sicherheitsdatenblätter PLASTECH RUBY (Version 02, Revision 1. April 2021), AUREX 30 SR (Version 02, Revision 29. Juni 2018), SFG und zehn weitere Handelsnamen (Version 02, Revision 22. März 2021), RUBY (Version 03, Revision 17. April 2020) sowie THERMOLITH (Version 01, 18. Mai 2021); Abschnitte 3 und 13. Abruf 11. Oktober 2026. [Quelle](#)
94. US Occupational Safety and Health Administration: Anhang D zu 29 CFR 1910.1200, Safety Data Sheets; Mindestinhalte der Abschnitte 2, 7, 10 und 13 sowie Tabelle D.1. Abruf 11. Oktober 2026. [Quelle](#)
95. Morgan Advanced Materials: Safety Data Sheet SDS 252, Cerachrome Blanket, Cerachrome Bulk, Z-Blok Modules (CR Grade) und weitere, Revision 1. Juni 2015; Abschnitte 3 und 10. Abruf 11. Oktober 2026. [Quelle](#)
96. European Industrial Gases Association: Doc 207, Safe operation and maintenance of furnaces insulated with refractory ceramic fibre; Definition der Stoffklasse mit einem Gehalt an Alkali- und Erdalkalioxiden von höchstens 18 Gewichtsprozent. [Quelle](#)
97. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 519, Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten; Fassung vom 28. Februar 2025 (GMBI 2025 S. 144-145), Nummern 2.7, 3.2, 5.1 bis 5.3 und 14.1 bis 14.3. Abgerufen am 13. Oktober 2026. [Quelle](#)
98. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IfA): Stoffinformation Asbest, harmonisierte Einstufung Carc. 1A (H350) und STOT RE 1 (H372); ohne hautbezogene und ohne umweltbezogene Einstufung. Abgerufen am 13. Oktober 2026. [Quelle](#)
99. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 401, Gefährdung durch Hautkontakt: Ermittlung, Beurteilung, Maßnahmen; Ausgabe Oktober 2022, zuletzt geändert GMBI 2024 S. 769 vom 19. September 2024; Abschnitt 3.2.3 Absatz 2 und Abschnitt 4.2 mit Tabelle 2. Abgerufen am 13. Oktober 2026. [Quelle](#)
100. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IfA): Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen, Chrom(VI); Aufnahmewege inhalativ und hautresorptiv, Einstufung Skin Sens 1 (H317), Carc. 1B (H350i), H400 und H410. Abgerufen am 13. Oktober 2026. [Quelle](#)
101. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 910, Anlage I: Chrom(VI)-Verbindungen, 1 µg/m³ einatembare Fraktion, Überschreitungsfaktor 8, Hinweis „siehe TRGS 561“. Abgerufen am 13. Oktober 2026. [Quelle](#)
102. Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft: MAK- und BAT-Werte-Liste 2026, Mitteilung 62; Eintrag „Chrom(VI)-Verbindungen (einatembare Fraktion)“ mit Hautres H, Sens Sh, Kanzenkat 1, KmutKat 2 sowie den dort genannten Ausnahmen.
103. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 26. November 2010, § 22 Ordnungswidrigkeiten; Fassung zuletzt geändert am 17. Dezember 2025. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
104. Chemikaliengesetz (ChemG), § 26 Bußgeldvorschriften, insbesondere Absatz 1 Nummer 8 Buchstabe b und Absatz 3; Neufassung vom 28. August 2013, zuletzt geändert am 29. März 2026. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
105. Chemikaliengesetz (ChemG), § 27 Strafvorschriften, Absätze 1 bis 4; Neufassung vom 28. August 2013, zuletzt geändert am 29. März 2026. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
106. Siebtes Buch Sozialgesetzbuch (SGB VII), § 110 Haftung gegenüber den Sozialversicherungsträgern. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
107. Strafgesetzbuch (StGB), § 326 Unerlaubter Umgang mit Abfällen, Absätze 1 und 5. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
108. Arbeidsomstandighedenwet (Niederlande), Hoofdstuk 7 Sancties: Artikel 32 Strafbepaling, Artikel 33 Overtredingen, Artikel 34 Hoogte bestuurlijke boete en recidive; geltende Fassung ab 1. Juli 2026. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)
109. Arbeidsomstandighedenbesluit (Niederlande), Artikel 4.17 Voorkomen van blootstelling; vervangen; geltende Fassung ab 1. August 2026. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)

110. Wet op de economische delicten (Niederlande), Artikel 1 Nummer 1, Artikel 2 Absatz 1 und Artikel 6 Absatz 1; geltende Fassung ab 1. Juli 2026. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)

111. Wetboek van Strafrecht (Niederlande), Artikel 23 Absatz 4, Geldbußenkategorien; Beträge seit 1. Januar 2026. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)

112. Health and Safety at Work etc. Act 1974 (Vereinigtes Königreich), Section 33 Offences und Schedule 3A, Mode of trial and maximum penalty. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)

113. The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (SI 2002/2677, Vereinigtes Königreich), Regulation 7, Prevention or control of exposure to substances hazardous to health. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)

114. Occupational Safety and Health Act (Vereinigte Staaten), Section 17 Penalties; Höchstbeträge der zivilen Geldbußen für Festsetzungen nach dem 15. Januar 2026 nach Angabe der US Occupational Safety and Health Administration. Abgerufen am 12. Oktober 2026. [Quelle](#)

## Versionsverlauf

| Version | Datum        | Änderung                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.0     | Oktober 2026 | Erstfassung                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1.1     | Oktober 2026 | Abschnitt 17 um Ölfilme und apolare Phasen als zweiten Weg der Minderbefundung erweitert; Abschnitt 26 (WD-40) mit den Messwerten von SEEF B.V. und der Herkunft der Praxis aus dem Energy-UK-Bulletin neu gefasst; Chronologie in Abschnitt 1 um den Eintrag Energy UK, September 2019, ergänzt; zwei neue Quellen. |
| 1.2     | Oktober 2026 | Abschnitt 16 um den Datenblattbefund erweitert: die Umwandlungsaussage von HarbisonWalker in Abschnitt 13 der Sicherheitsdatenblätter, die Zusammensetzungen der betroffenen Feuerfestprodukte und das Fehlen einer Calciumzeile in den Faserblättern; vier neue Quellen.                                            |