Die übersehene Zutat

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

von Markus Sommer

Długołęka, Oktober 2026

Version 1.10 · 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 Heißteile 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 Heißteile 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 28). 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 Heißteil, 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 Heißteil 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 Heißteil 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

A. Das übersehene Thema 9

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. Grundlagen 19

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

C. Isoliertechnik: Heißteile und Dämmung 23

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

D. Fahrzeuge 40

20. Fahrzeugmotoren und Motorräume 40

E. Verbrennungsrückstände: Aschen, Kesselablagerungen, Feuerbestattung 43

21. Verbrennungsaschen und Kesselablagerungen 43
22. Wissensstand in Europa zu Verbrennungsrückständen 44
23. Feuerbestattungen und weitere chromhaltige Verbrennungsgüter 45

F. Gesundheit, Regulierung, offene Fragen und Schlussfolgerung 46

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) 52
27. Chrom(III): der angenommene Endzustand 58
28. Eigene Feldbefunde 62
29. Was noch untersucht werden kann und was nicht mehr offen ist 62
30. Rechtsfolgen bei Nichteinhaltung 63
31. Zur Auswahl des zitierten Regelwerks 66
32. Größenordnung: ein Gedankenversuch 68
33. Die Pflichtenlage in Deutschland 70
34. Die Pflichtenlage in der Europäischen Union 76
35. Die Pflichtenlage in den Niederlanden 79
36. Die Pflichtenlage im Vereinigten Königreich 85
37. Anhang: Dämmstoffe mit basischen Oxiden und ihre Einsatzorte 94
38. Schlussfolgerung 98

Quellen 100

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_2O_3 und CaO mit dem Produkt $CaCrO_4$ (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]	$CaCrO_4$ und Na_2CrO_4 an der Grenzfläche zwischen chromhaltigem Metall und Wärmedämmstoff experimentell identifiziert (Abschnitt 10).
2019	Herstellerkorrespondenz [redacted] [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	[redacted], [redacted] [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	[redacted], [redacted]; [redacted], [redacted] [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 Heißteile 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-eingestuft, 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. $CaCrO_4$ und Na_2CrO_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 Na_2CrO_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 Heißteil, 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 $CaCrO_4$ und am natriumhaltigen Dämmstoff Na_2CrO_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 (CaO), im Hochtemperaturbereich Calciumsilikatmatten und Superwool (CaO); weiterführende Abgasleitungen mit Mineralwolle (CaO/Na_2O) als Bahnenware; Isolierkissen und Isoliermatratzen aus Glasgewebe (CaO) und Mineralwolle (CaO/Na_2O)	Am und auf dem Motor vor allem Calciumchromat; an Zu- und Abgangsleitungen Calcium- und/oder Natriumchromat	Bei Wartungsarbeiten schon heute die REACH-Verwendungsfrage zu Natriumchromat, wenn ausgebaute 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
Gas- und Dampfturbinen	In sehr heißen Bereichen hochcalciumhaltige Calciumsilikatprodukte; anschließende Isoliermatratzen oft aus E-Glas- und Mineralwolleprodukten	Calcium- und/oder Natriumchromat	wie bei Motoren
Biogasanlagen, BHKW und KWK	wie bei Motoren und Turbinen	wie bei Motoren und Turbinen	wie bei Motoren
Lebensmittelverarbeitung, Gewächshäuser und Plantagen mit BHKW	wie bei BHKW	wie bei BHKW	wie bei Motoren
Rechenzentren, Notstromaggregate, dezentrale Energieversorgung öffentlicher Gebäude und Krankenhäuser	wie bei BHKW, KWK und Turbinen	wie bei BHKW, KWK und Turbinen	wie bei Motoren
Fahrzeuge, Baumaschinen, Abgasnachbehandlung	Hitzeschilde, etwa am Turbolader, mit vor allem calciumoxidhaltigen Filzen und Matten, teils Calciumsilikat-Aufbauten; Außendämmung an DPF und SCR; geclipste, sauerstoffoffene Doppelwandungen von Heißteilen mit innenliegenden Dämmstoffen (E-Glas, Calciumsilikat)	vor allem Calciumchromat	wie bei Motoren
Müllverbrennung	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: Einzubeziehen 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 Heißteilen 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 Heißteile 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 eingestufter 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 Heißteil und basischer Dämmung. „Asbestfrei" ist keine Aussage darüber, ob ein Dämmstoff auf chromlegierten Heißteilen 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 Heißteilen 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 (Na_2CO_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-/Cr_2O_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:

> $2\ Cr_2O_3 + 4\ CaO + 3\ O_2 \rightarrow 4\ CaCrO_4$

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

> $2\ Cr_2O_3 + 4\ Na_2CO_3 + 3\ O_2 \rightarrow 4\ Na_2CrO_4 + 4\ CO_2$

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-Cr(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_2O_3 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 $CaCrO_4$ nach. In inerter Atmosphäre nur dreiwertiges $Ca(CrO_2)_2$. [50]	Früher direkter Phasennachweis von $CaCrO_4$ aus Cr_2O_3 und CaO; Sauerstoff als zwingende Voraussetzung belegt. Die Arbeit entstand zur Hausmüllverbrennung; Rostaschen und Pilotanlage siehe Abschnitt „Paoletti 2002" bei den Verbrennungsaschen.
Verbinnen et al. (2013)	Cr_2O_3 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 $CaCrO_4$; 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 $CaCrO_4$ bzw. Na_2CrO_4 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_2O_3 und Alkali- beziehungsweise Erdalkaliverbindungen. Die Studie trennt einen oft verwischten Punkt klar: Cr_2O_3 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 Schlamms 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 $CaCrO_4$

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_2O_3+x).
- Zwischen 500 und 900 °C reagierte Cr(III) unmittelbar mit CaO zu auslaugbarem $CaCrO_4$. 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_2O. Nach Wärmebehandlung in Luft wurden an den Kontaktflächen gelbliche Reaktionsprodukte nachgewiesen:

- Beim calciumhaltigen Dämmstoff identifizierte die XRD-Analyse $CaCrO_4$, beim natriumhaltigen Dämmstoff Na_2CrO_4.
- Bei SUS304 und calcium-silikatischem Dämmstoff wurden nach 1.000 Stunden bei 873 K (rund 600 °C) 160 mg Cr(VI) pro m² Kontaktfläche gemessen.
- Nach 5.000 Stunden bei 873 K betrug die Cr(VI)-Menge am unbeschichteten SUS304-/Ca-Si-O-System 940 mg/m²; mit dem weiteren calciumhaltigen, selbsthärtenden Beschichtungsdämmstoff 3.890 mg/m².

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_2O_3-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 Heißteilen 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 $CaCrO_4$ und Na_2CrO_4 direkt beobachtet (Sayano).

C. Isoliertechnik: Heißteile und Dämmung

11. Von der metallurgischen Röstung zur Hochtemperaturdämmung

Die historische Patentschrift beschreibt eine bewusst intensivierte metallurgische Röstung. Ihre Bedeutung für Dämmstoffe auf chromlegierten Heißteilen 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 Dämmstoffbestandteile
Soda bzw. Natriumcarbonat	Natriumhaltige Glas-, Faser-, Binder- oder sonstige Produktbestandteile
Röstung 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 Stähle mit alkali- und erdalkalimetallhaltigen Dämmstoffen oder Montagepasten kann es bei Stahltemperaturen von etwa 350 bis 800 °C zur Bildung krebserzeugender Chromate kommen. Als Einflussgrößen 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 Präventionsansatzes 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 $CaCrO_4$-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 Heißteilen 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 Al_2O_3-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, $p(H_2O)$ etwa 0,16 bar; 900 Standard-cm³/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 $CaCrO_4$ oder Na_2CrO_4 im Faserexperiment.
van Leeuwen et al. 2024 [36]	Cr_2O_3-Pulver als Quelle; heißer Bereich etwa 800-850 °C; rund 3 Vol.-% Wasser in Luft; etwa 600 cm³/min; 150 h. Fasern getrennt im kühleren Auslassbereich.	Cr(VI) wird nasschemisch mit Diphenylcarbazid/UV-Vis, Gesamtchrom mittels ICP-OES bestimmt. $CaCrO_4$ 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.	$CaCrO_4$ und Na_2CrO_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 $CaCrO_4$ 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 $CaCrO_4$ ein Cr(VI)-Chromat; $CaCr_2O_4$ 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 Gefährdungsdimension
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 Heißteilen	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_2O_3 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_2O_2), 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 Tumorinitiation und Tumorprogression 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_2O_2-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 Heißteilen 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 Heißteilen 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 Heißteilen 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 gefolgert wurde

Der gezogene Schluss war naheliegend: Das Produkt enthielt Chrom, also wurden chromhaltige Produkte abgewählt. 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 Heißteil, 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 / Caterpillar Energy 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.
[redacted]	[redacted], 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 $CaCrO_4$ 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 CaO, Sauerstoff, über 350 °C. Eigene Produkte können bei Vorliegen der Bedingungen zur Cr(VI)-Bildung beitragen.
Rockwool Technical Insulation	95-100 % Steinwolle; zusammen mehr als 18 % Alkali-/Erdalkalioxidanteile. Cr(VI)-Ablagerungen auf Edelstahl und Mineralwolle beschrieben.	Erörtert Ablagerungen bei heißem Edelstahldraht. Bei auffälligen Ablagerungen Schnelltest; bei Cr(VI) spezifische Arbeitsschutz-/Hygienevorgaben. Beim Ausbau auffälliger Ablagerungen ebenfalls Schutzmaßnahmen.
[redacted]	Service Information [redacted] vom 07.08.2025: Cr(VI)-Bildung auf Oberflächen heißer, chromhaltiger Abgaskomponenten.	Nennt unter anderem Turbolader, Abgaskrümmer, EGR, Katalysatoren und DPF; verlangt Schutzmaßnahmen, untersagt Druckluftreinigung und beschreibt Neutralisierung. [22]

Herausgeber	Dokumentierter Befund	Aussage zur Entstehung und Prävention
[redacted]	[redacted] vom 27.08.2025: bestätigte Cr(VI)-Kontaminationen unter anderem an Hitzeschilden, Abgaskrümmern und Turboladern.	Warnung ausdrücklich für Personal im Motorraum, Fahrzeugreparaturen und Komponentenhandhabung; Kontamination kann unsichtbar sein. Vorgaben zu PSA, Hygiene und 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 vereinzeltes, 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 Faser- beziehungsweise 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 Annahmebereich 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/m³ für Chrom(VI)-Verbindungen; davor galten 0,010 mg/m³ und beim Schweißen und Plasmaschneiden 0,025 mg/m³. [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 Heißteilen 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/m³ 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/m³ als Cr
Vereinigtes Königreich	COSHH Regulations 2002, EH40	0,01 mg/m³, 8-Stunden-Mittelwert; 0,025 mg/m³ prozessbedingt erzeugt [42]
Vereinigte Staaten	OSHA 29 CFR 1910.1026	PEL 5 µg/m³, Action Level 2,5 µg/m³

Die Zahlenwerte liegen um den Faktor 10 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. Das Merkblatt INDG346 derselben Behörde führt weiterhin den Wert von 0,05 mg/m³, der bis zum 17. Januar 2020 galt [88].

Die Luftkonzentration beschreibt dabei nur einen von zwei Expositionspfaden. Chrom(VI)-haltige Stäube verteilen sich im Arbeitsbereich nicht gleichmäßig, und bei Arbeiten an gedämmten Heißteilen 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 Verbrennungsaschen 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 Heißteile 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 Heißteil, 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 Heißteil, 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 Entstehungspfads 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. [redacted] beschreibt die Bildung auf heißen Oberflächen chromhaltiger Abgaskomponenten. [redacted] 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_2	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-Abgaskrümmer, Turboanwendungen bei Off-Road-Fahrzeugen und Abgaskrümmer in Schifffahrt/Energieerzeugung. Als Kapselmaterialien werden unter anderem austenitische und ferritische Edelstähle genannt. [49]

Damit ist die gezielte Vermarktung eines calciumhaltigen Dämmstoffs für automobile Heißteilanwendungen 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
Fahrzeug als Kaufgegenstand	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]
Sicherheit und behördliche Maßnahmen	Die Fahrzeugverordnung 2018/858 regelt Abhilfe und Information bei Nichtkonformität beziehungsweise ernstem Risiko. Die Einordnung eines chromatbelasteten Fahrzeugtyps verlangt eine konkrete Risikobewertung. [47]

Die EU-Verbraucherkaufregeln 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 Heißteilen, 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 Cr_2O_3 und CaO in synthetischer Luft zeigten eine schnelle Massenzunahme zwischen 500 und 850 °C. Nach einer Stunde bei 850 °C wies die Röntgenbeugung sechswertiges $CaCrO_4$ nach. In inerter Atmosphäre entstand dagegen nur dreiwertiges $Ca(CrO_2)_2$. [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 WTERT Fall Meeting an der Columbia University in New York vor, einschließlich der Thermogravimetrie zu Cr_2O_3 und CaO mit dem Produkt $CaCrO_4$. 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 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 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 $CaCrO_4$ aus Cr_2O_3 und 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 $CaCrO_4$ 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 Heißteiloberflächen, 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 Staubmessung 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 Krematorien. Alle enthielten Cr(VI). Bei der Extraktion mit 0,01 M $CaCl_2$, 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 haltezeitabhängige 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 1), 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 ($ZnCrO_4$) an nicht malignen, immortalisierten menschlichen bronchialen Fibroblasten. Exponiert wurde mit 0,1, 0,2 und 0,3 µg/cm² 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 µg/cm² ist jedoch keine Luftkonzentration in µg/m³; 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 Heißteilen, 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 Materialschleusen [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 µg/m³ 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.

Pflichten vor Arbeitsbeginn: Erkundung, Beurteilung und das Verbot des Beginnens

Die Pflichten vor Arbeitsbeginn sind in den hier betrachteten Rechtsräumen überwiegend stoffoffen gefasst. Die deutsche Gefahrstoffverordnung verpflichtet den Arbeitgeber in § 6 Absatz 2a, die ihm nach § 5a Absatz 1 übermittelten Informationen daraufhin zu prüfen, ob bei den Tätigkeiten Gefahrstoffe aus der baulichen oder technischen Anlage freigesetzt werden und die Gesundheit der Beschäftigten gefährden können. Reichen die Angaben des Veranlassers nicht aus, hat er diese Prüfung nach Absatz 2b selbst vorzunehmen und sich dabei externen Sachverstands zu bedienen, wenn ihm die erforderlichen Kenntnisse fehlen, insbesondere dann, wenn eine technische Erkundung erforderlich wird. Ist eine technische Erkundung erforderlich, um die Gefährdungsbeurteilung durchzuführen und die Schutzmaßnahmen festzulegen, so ist sie nach Absatz 2c Voraussetzung für die Durchführung der Tätigkeiten. § 7 Absatz 1 untersagt die Aufnahme der Tätigkeit, bevor die Gefährdungsbeurteilung durchgeführt und die erforderlichen Schutzmaßnahmen ergriffen worden sind, und § 6 Absatz 8 Satz 1 verlangt die Dokumentation erstmals vor Aufnahme der Tätigkeit, unabhängig von der Zahl der Beschäftigten. Der Begriff in diesen Absätzen lautet Gefahrstoffe; Asbest wird dort nicht genannt. [120]

Die Baujahrsangabe steht an anderer Stelle. § 5a Absatz 2 der deutschen Gefahrstoffverordnung verpflichtet den Veranlasser, zur Feststellung, ob Asbest vorliegt, bei einem Baujahr zwischen 1993 und 1996 das Datum des Baubeginns mitzuteilen und sonst das Baujahr. Für in situ gebildete Chromate hat diese Angabe keine Aussagekraft, weil die Verbindung nicht beim Bau eingebracht wird, sondern im Betrieb entsteht. Eine im Jahr 2024 errichtete Anlage mit chromlegierten Heißteilen und calciumhaltiger Dämmung fällt unter denselben Wortlaut wie ein Altbestand. [120]

Das niederländische Arbeidsomstandighedenbesluit verlangt in Artikel 4.2 Absatz 1 die Beurteilung von Art, Ausmaß und Dauer der Exposition im Rahmen der Risico-Inventarisatie en -Evaluatie, auch wenn solche Tätigkeiten gegenwärtig nicht ausgeführt werden. Absatz 3 verlangt die Feststellung des Expositionsniveaus, Absatz 7 den Abgleich mit dem für den Stoff festgelegten Grenzwert und Absatz 8 die Überprüfung, sobald mit neuen Tätigkeiten begonnen wird, bei denen Gefahrstoffe beteiligt sind. Artikel 4.1b Absatz 2 führt diese Beurteilung als eine der Bedingungen auf, unter denen die allgemeine Schutzpflicht als erfüllt gilt. Ein ausdrückliches Verbot, vor der Beurteilung zu beginnen, enthält Artikel 4.2 nicht. Es steht asbestbezogen in Artikel 4.54a Absatz 1, wonach die Anwesenheit von Asbest vollständig zu inventarisieren ist, bevor mit dem Abbruch oder der Demontage, mit der Entfernung oder mit dem Aufräumen nach einem Zwischenfall begonnen wird, ausgeführt durch ein Unternehmen mit Zertifikat für die Asbestinventarisierung. [121]

Im Vereinigten Königreich steht das Verbot stoffoffen in Regulation 6(1) der Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002: „An employer shall not carry out work which is liable to expose any employees to any substance hazardous to health", solange keine „suitable and sufficient assessment of the risk created by that work" vorliegt und die daraus folgenden Schritte nicht umgesetzt sind. Regulation 6(2) zählt auf, was die Beurteilung zu berücksichtigen hat, darunter die Angaben des Lieferanten einschließlich des Sicherheitsdatenblatts, Höhe, Art und Dauer der Exposition sowie Tätigkeiten wie die Instandhaltung, die zu hoher Exposition führen können. Asbestbezogen tritt Regulation 5 der Control of Asbestos Regulations 2012 hinzu, wonach ein Arbeitgeber Abbruch-, Instandhaltungs- und andere Arbeiten, die Beschäftigte Asbest aussetzen oder auszusetzen geeignet sind, nicht ausführen darf, sofern er nicht entweder eine „suitable and sufficient assessment" zum Vorhandensein, zur Art und zum Zustand des Asbests durchgeführt hat oder, bei Zweifeln, dessen Anwesenheit unterstellt und die Verordnung anwendet. [122, 123]

In den Vereinigten Staaten verpflichtet 29 CFR 1926.1126(d)(1) jeden Arbeitgeber, dessen Arbeitsstätte oder Arbeitsverfahren unter den Standard fällt, die Achtstunden-Schichtmittelwerte für jeden gegenüber Chrom(VI) exponierten Beschäftigten zu bestimmen. Nach (d)(2) geschieht das über eine Erstmessung mit einer ausreichenden Zahl personengetragener Luftproben je Schicht, Tätigkeitsgruppe und Arbeitsbereich, nach (d)(3) über eine Kombination aus Messdaten, historischen Daten oder objective data. Nach (d)(2)(vi) sind zusätzliche Messungen durchzuführen, wenn sich Prozess, Rohstoffe, Ausrüstung, Personal, Arbeitsverfahren oder Schutzmaßnahmen so ändern, dass neue oder zusätzliche Expositionen entstehen können. Ein Beginnverbot nach dem Muster des deutschen § 7 Absatz 1 oder der britischen Regulation 6(1) enthält der Chrom(VI)-Standard nicht. Die strukturelle Entsprechung steht im Asbeststandard: 29 CFR 1926.1101(k)(2)(i) verpflichtet die Eigentümer von Gebäuden und Anlagen, Vorhandensein, Lage und Menge asbesthaltiger und als asbesthaltig vermuteter Materialien festzustellen, und die Begriffsbestimmung in (b) unterstellt für Wärmedämmungen sowie aufgetragene Oberflächenmaterialien in Gebäuden mit Baujahr nicht später als 1980 einen Asbestgehalt, solange diese Vermutung nicht nach (k)(5) widerlegt ist. Die initial exposure assessment nach (f)(2)(i) hat eine competent person unmittelbar vor oder zu Beginn der Arbeiten durchzuführen. [124, 125]

Für den hier behandelten Anwendungsfall knüpft die deutsche TRGS 561 das Schutzregime in Abschnitt 5.9.3 Absatz 5 an Tätigkeiten an Industriekomponenten, „an denen eine Chrom(VI)-Belastung vorliegt oder bei denen diese nicht auszuschließen ist". Die Pflicht entsteht damit vor dem Befund. Das Fehlen einer Messung begründet keinen Ausschluss, und die Erkundung ist der Weg, auf dem sich ein Ausschluss überhaupt erst belegen ließe. [19]

Als Bewertung: zwei der vier Rechtsräume enthalten das Verbot, vor der Beurteilung zu beginnen, in stoffoffener Form, Deutschland über § 7 Absatz 1 der Gefahrstoffverordnung und das Vereinigte Königreich über Regulation 6(1) COSHH. In den Niederlanden und den Vereinigten Staaten liegt die Vorabpflicht in der allgemeinen Gefahrstoffregel als Beurteilungs- und Feststellungspflicht, während das zeitlich vorgezogene Verbot und die Vermutungsregel im Asbestregime stehen. Die im vorigen Unterabschnitt beschriebene Ungleichbehandlung findet sich damit auch in der Normstruktur wieder, und zwar als Unterschied in der Verfahrenstiefe, nicht als Unterschied im Grundsatz.

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]

[redacted] 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]

Der Begriff ist bereits sachlich falsch. Eine Neutralisation im chemischen Sinn ist die Reaktion einer Säure mit einer Base zu Salz und Wasser, also eine Verschiebung des pH-Werts. Chromat ist kein Säure-Base-Problem. Der Übergang von Chrom(VI) zu Chrom(III) ist eine Redoxreaktion, die ein geeignetes Reduktionsmittel, einen geeigneten pH-Bereich, ausreichende Kontaktzeit und einen Wirksamkeitsnachweis voraussetzt.

Wie die Anwendung in der Praxis aussieht, zeigt die Arbeitsanweisung „Instructie voorkomen blootstelling aan Chroom(VI)" von Vattenfall Generation NL, erste Fassung vom 18. Februar 2019, zuletzt gesamt aktualisiert am 29. April 2024. Sie beschreibt den Bildungsweg zutreffend: Calciumchromat entstehe, wenn ein chromhaltiges Grundmetall mit Calcium und einem Oxidationsmittel bei Temperaturen um oder über 350 °C in Kontakt komme; als bislang identifizierte Calciumquellen nennt sie bestimmte Anti-Seize-Pasten und calciumhaltiges Isoliermaterial. Zur Behandlung sieht sie zwei Mittel vor, den Siemens Umwandler Spray und eine selbst angesetzte Ascorbinsäurelösung, beide mit begrenzter Haltbarkeit und sichtbar anzugebendem Anmischdatum, das Pulver zwei Jahre, die nasse Lösung eine Woche. Die Oberfläche wird besprüht oder befeuchtet, die Lösung muss klebrig genug sein oder dauerhaft nass gehalten werden, weil die Umwandlung einige Minuten dauern kann, danach wird mit einem Tuch gereinigt. [115]

Ascorbinsäure ist, anders als das weiter unten behandelte Kriechöl, ein echtes Reduktionsmittel. Der Einwand richtet sich deshalb nicht gegen den Stoff, sondern gegen die Bedingungen. Die Wirksamkeitsbelege für die Reduktion von Chrom(VI) stammen aus Flüssig-Flüssig-Systemen. Hier handelt es sich um eine Flüssig-Trocken-Behandlung einer offenen Oberfläche, die im Turbinen- und Motorenumfeld regelmäßig Öl- und Fettrückstände trägt. Eine vollständige Umsetzung ist unter diesen Bedingungen nicht zu erwarten, und für Hochtemperaturdämmungen liegt kein Wirksamkeitsnachweis vor.

Die Erfolgskontrolle hängt vollständig am kolorimetrischen Schnelltest, in der Anweisung dem TK11-Testkit von MATinspired. Fällt er negativ aus, sind nach dem Wortlaut keine weiteren Maßnahmen und keine Schutzausrüstung erforderlich. Jeder Reinigungsvorgang ist mit einem negativen Test zu beenden, und auch Werkzeug und benutzte Vollmasken gehen nach negativem Test zurück ins Lager. Luftmessungen hält die Anweisung im Regelfall für entbehrlich. Welche Aussagekraft ein solcher Test hat, zeigt die französische Feldstudie: Am Turbolader wies die Laboranalytik 869 ng Cr(VI) nach, während der kolorimetrische Schnelltest an derselben Stelle negativ ausfiel (Abschnitt 19). [115]

Die Isoliermatratzen werden nach derselben Anweisung mit Ascorbinsäure benebelt und anschließend wieder eingesetzt; übriges Isoliermaterial wird benebelt und als Betriebsabfall entsorgt. Damit kehrt der Reaktionspartner mit dem Material an das Heißteil zurück, und beim nächsten Hochfahren sind alle Bildungsbedingungen erneut erfüllt. Für Asbest existiert keine Anweisung, Fasern zu behandeln und das Material anschließend wieder einzubauen. [115]

Für Hardware von GE ist die Ascorbinsäure nach einem Schreiben des Herstellers ausgesetzt, weil sie die Mikrostruktur des Materials negativ beeinflusse; vorgeschrieben ist dort stattdessen die Reinigung mit WD-40. [115]

Die Konferenz vom 6. November 2025 und ein Zertifikat, das seine Grenzen nennt

Auf der Veranstaltung „Chroom-6 verbindingen onder thermische isolatie" von iTanks und dem Chroom 6 Informatie Kennis Centrum am 6. November 2025 traten sechs Anbieter mit Pitches auf: Insulcon, Kavarmat, OOI, Ecopoint, Sherwin Williams und Econtras. Ecopoint stellte den „Chrome-6 Neutralizer" vor, nach eigener Beschreibung eine Lösung von Säuren, die Cr(VI) zu Cr(III) reduziert, gebrauchsfertig und mindestens zwei Jahre haltbar. Die Bildungsbedingungen sind auf der Folie zutreffend genannt: Chrom im Edelstahl, Temperatur über 250 °C, calciumhaltige Isolierung, daneben Kalium, Natrium oder Magnesium, dazu Feuchte und Kondensation. [116]

Das Zertifikat, das SEEF B.V. im August 2025 im Auftrag von Eco-Point International BV zum Chrome-VI Neutralizer (PR269) erstellt hat, ist in seiner Anlage korrekt, weil es nicht mehr behauptet, als geprüft wurde. Die Wirksamkeit gilt danach, „mits deze verbindingen oplosbaar zijn in de neutralizer-oplossing", also nur soweit die Verbindungen in der Lösung löslich sind. Das Produkt altert und verliert an Wirkung, die behandelte Fläche ist mindestens 15 Minuten nass zu halten und muss ausreichend abgekühlt sein, und bleibt der Test danach positiv, war die Behandlung unzureichend und zu wiederholen. Zur Kontrolle hält das Zertifikat fest: „Een negatieve uitslag is echter niet betrouwbaar", ein negatives Swab-Ergebnis ist nicht belastbar; empfohlen wird dann eine zuverlässige Analyse, SEEF TK01 oder Laboranalytik. Und weiter: „Het is echter geen garantie dat blootstelling volledig wordt voorkomen", das Produkt sei „een hulpmiddel binnen een veiligheidsstrategie en geen oplossing die alle risico's zelfstandig elimineert". Ein Dokument, das die eigene Reichweite derart offenlegt, ist der Maßstab, an dem sich messen lässt, was daraus gemacht wird. [116]

Was daraus auf der Folie wird

Die Pitch-Folie gibt vier Punkte wieder: effektive Neutralisation, 15 Minuten Einwirkzeit auf abgekühltem Untergrund, signifikante Verringerung der Expositionswahrscheinlichkeit und Hilfsmittel innerhalb einer Sicherheitsstrategie. Nicht wiedergegeben sind die Löslichkeitsbedingung, die Alterung, die Wiederholung bei positivem Test und der Satz zur Unzuverlässigkeit des negativen Testergebnisses. Die Abschlussfolie wirbt stattdessen mit „Bewezen actieve RTU vloeistof" und „Meten is weten!". Damit wird die Messung zum Argument, während sie im Zertifikat die Stelle ist, an der vor dem negativen Ergebnis gewarnt wird. Der Produktname „Neutralizer" trägt dasselbe Missverständnis im Titel, denn beschrieben wird eine Säurelösung, die reduziert. [116]

Die Anweisung und ihr Zeitpunkt

Die Arbeitsanweisung von Vattenfall Generation NL ist älter als diese Unterlagen. Die Ascorbinsäure kam nach ihrem eigenen Versionsverlauf am 11. Juni 2019 hinzu, die Reinigung mit WD-40 für Hardware von GE am 28. Oktober 2022, die letzte Gesamtaktualisierung datiert vom 29. April 2024. Sie konnte das Zertifikat von August 2025 und die Untersuchung zu WD-40 von September 2026 nicht kennen. Beurteilt werden kann daher nicht ihre Entstehung, sondern ihr Fortbestand. Auf der Veranstaltung vom 6. November 2025, drei Monate nach dem Zertifikat, trug Econtras, ein Isolierbetrieb der Isolatiebedrijf C.J. van Waas BV, unter der Überschrift „Reinigen met Ascorbinezuur" dieselbe Anweisung unverändert vor, einschließlich der Angabe, es handele sich um eine von Vattenfall selbst hergestellte Ascorbinsäurelösung, und einschließlich des Satzes, bei negativem Testergebnis seien keine weiteren Maßnahmen erforderlich. [115, 116]

Dasselbe Labor, zwei Dokumente

Für das in der Anweisung vorgeschriebene Kriechöl hat dasselbe Labor, das dem Neutralizer die Wirksamkeit unter Bedingungen bescheinigt hat, jede Reduktionswirkung widerlegt: 96,8 Prozent Wiederfindung bei bereits gelöstem Chrom(VI), keine Dosis-Wirkungs-Beziehung bei vollständiger Extraktion und 5,8 Prozent Wiederfindung am Feststoff als Löslichkeitsartefakt. Die beiden Befunde widersprechen einander nicht, sie trennen das Wirksame vom Unwirksamen. In der Arbeitsanweisung stehen beide Mittel als gleichwertige Reinigungsmethoden nebeneinander.

Die Folge im Arbeitsschutz

Die Entlastung von Schutzmaßnahmen hängt in dieser Praxis an einem Verfahren, dessen negatives Ergebnis das Prüflabor schriftlich für nicht belastbar erklärt. Diese Feststellung betrifft das Testverfahren und nicht ein einzelnes Produkt. Dieselbe Richtung zeigt die französische Feldstudie mit 869 ng Cr(VI) in der Laboranalytik am Turbolader gegen ein negatives Schnelltestergebnis an derselben Stelle (Abschnitt 19). Eine Maßnahme, deren Erfolgskontrolle falsch negativ ausfallen kann, erfüllt die Pflicht aus § 7 Absatz 9 der deutschen Gefahrstoffverordnung nicht, die Wirksamkeit dort, wo keine Grenzwerte bestehen, mit geeigneten Methoden zu überprüfen. Praktisch führt sie dazu, dass Schutzausrüstung abgelegt wird, Werkzeug und Atemschutz in den gemeinsamen Bestand zurückgehen und benebeltes Isoliermaterial wieder eingebaut wird. Für Asbest würde niemand einen Schwarzbereich auf Grundlage eines Farbschnelltests freigeben.

Das Zertifikat ist das genaueste Dokument dieser Kette und das einzige, das seine eigenen Grenzen benennt; die Prüfstelle trifft daran keine Kritik, im Gegenteil, sie hat Befund und Reichweite vollständig ausgewiesen. Was daraus im industriellen Umlauf wird, ist etwas anderes: Unter bekannten Logos werden korrekte Bescheinigungen auf vier Werbepunkte verkürzt, die Bedingungen fallen weg, und dem fachfremden Leser wird Sicherheit suggeriert, wo die Bescheinigung ausdrücklich keine gibt. Am weitesten reicht dabei die Wirkung der technischen Anweisungen großer Konzerne, denn sie stellen den Umgang mit einer krebserzeugenden und gewässergefährdenden Verbindung als normalen Arbeitsschritt dar, mit Sprühflasche, Lappen, Teststreifen und anschließender Wiederverwendung des Materials.

Die Reduktionserzählung außerhalb der Betreiber

Die deutsche Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft führt auf ihrer Seite „Chrom(VI)-Verbindungen an Edelstahl" aus, es „können chromatreduzierende Faserbindemittel eingesetzt werden", und: „Diese reduzieren das Chromat zu unkritischen Chrom(III)-verbindungen und binden Fasern." Als einziger Vorbehalt folgt, die Anwendung eines Reduktionsmittels könne „gegebenenfalls negative Einflüsse auf die behandelten Materialien haben" und sei mit dem Auftraggeber abzusprechen. Ein Wirksamkeitsnachweis, die Anwesenheit von Ölen und Fetten und die Pflicht aus § 7 Absatz 9 der deutschen Gefahrstoffverordnung, die Wirksamkeit dort, wo keine Grenzwerte bestehen, mit geeigneten Methoden zu überprüfen, kommen nicht vor. Die Einstufung des Reaktionsprodukts als unkritisch bleibt zudem ohne Bezug auf die Befunde, die weiter unten behandelt werden: die Sensibilisierungsmarkierung Sh, die die MAK- und BAT-Werte-Liste 2026 für die löslichen Chrom(III)-Verbindungen führt, die Bewertung der französischen Agentur Anses von 2021 und die Mobilisierung fasergebundenen Chrom(III) als Chrom(VI) nach Walter et al. 2022. Dieselbe Seite hält an anderer Stelle fest, der chemische Bildungsmechanismus sei „gegenwärtig noch nicht vollständig geklärt", und benennt im selben Text die alkali- und erdalkalimetallhaltigen Wärmedämmstoffe als begünstigenden Faktor. [117]

Wie eine belegte Reduktion organisiert ist, zeigt der Zement. Eintrag 47 des Anhangs XVII der REACH-Verordnung begrenzt löslichen Chrom(VI) in Zement auf 0,0002 Prozent, also 2 ppm der Trockenmasse. Erreicht wird das durch Zugabe eines Reduktionsmittels, überwiegend Eisen(II)-sulfat, stöchiometrisch 3,22 mg Fe(II) je mg Cr(VI), in der Praxis acht- bis zwanzigfach überdosiert, homogen eingemischt, mit einer Reaktion, die erst mit dem Anmachwasser beginnt, und geprüft nach EN 196-10. Die Wirkung lässt bei Lagerung nach, Feuchtigkeit und Sauerstoff beschleunigen das. Übertragen wird daraus das Aufsprühen einer Lösung auf eine ölhaltige Oberfläche im Maschinenraum, ohne Dosierkontrolle, ohne genormtes Prüfverfahren und mit einem Schnelltest als Abnahme. [118, 119]

Dieselbe Berufsgenossenschaft, zwei Darstellungen

Die Betriebsanweisung „Ausbau chromatbelasteter Dämmstoffe" nach § 14 der deutschen Gefahrstoffverordnung, abrufbar über das Gefahrstoffinformationssystem WINGIS der deutschen Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, stuft die Tätigkeit mit dem Satz „Diese Tätigkeiten oder Verfahren sind krebserzeugend." ein, führt das Signalwort Gefahr und hält fest: „Chrom(VI)-Verbindungen kann Krebs erzeugen!" Sie schreibt die Abgrenzung der Arbeits- und Sanierungsbereiche mit Hinweisschild vor, staubarme Arbeitsverfahren und Geräte, Arbeiten nur mit Absaugung, Arbeiten bei Frischluftzufuhr, Entstauber und Industriesauger der Staubklasse H, die laufende Kontrolle von Funktion und Absaugleistung, Folienabdeckung bei mangelnden Reinigungsmöglichkeiten, das Schneiden des Materials ausschließlich mit Messer, Schere oder Handsäge, die sofortige Sammlung der Abfälle, getrennte Umkleideräume und einen Waschraum mit Duschen als Schwarz-Weiß-Anlage, die Sammlung der Einwegschutzanzüge nach Schichtende und den Satz „Ausgebaute Mineralwolleprodukte nicht wiederverwenden." An persönlicher Schutzausrüstung verlangt sie eine Korbbrille bei Überkopfarbeiten und starker Staubentwicklung, Schutzhandschuhe aus chromatfreiem Leder oder nitrilgetränkte Baumwollhandschuhe, einen Einwegschutzanzug Typ 5 und Atemschutz mit der Vorgabe „Immer Atemschutz tragen.", ausgeführt als Partikelfilter P3 an Halb- oder Viertelmaske oder als partikelfiltrierende Halbmaske FFP3. In dieser Aufzählung steht „Chromatreduzierende Faserbindemittel verwenden." an zweiter Stelle, zwischen der Zonierung und den staubarmen Arbeitsverfahren. [126]

Gegenüber der deutschen TRGS 561 geht die Betriebsanweisung in mehreren Punkten weiter. Abschnitt 5.9.3 Absatz 5 lässt für kurzzeitige Tätigkeiten Atemschutz der Klasse FFP2 zu, die Betriebsanweisung kennt keine Kurzzeitstufe und verlangt durchgehend P3 oder FFP3. Staubklasse H, Frischluftzufuhr und die Schwarz-Weiß-Anlage nennt die TRGS an dieser Stelle nicht. Beim Augenschutz liegt die Betriebsanweisung darunter, weil die TRGS ihn ohne Einschränkung fordert, während die Betriebsanweisung ihn an Überkopfarbeiten und starke Staubentwicklung knüpft. Das chromatreduzierende Faserbindemittel kommt in der TRGS 561 an keiner Stelle vor; die Begriffe Faserbindemittel, Bindemittel und Neutralisation fehlen dort vollständig. [126, 19]

Die öffentlich zugängliche Informationsseite derselben Berufsgenossenschaft führt von diesem Katalog keinen einzigen Punkt. Sie beschreibt den Bildungsweg, nennt als begünstigende Faktoren hochchromlegierte Stähle, Sauerstoff, Temperaturen von etwa 350 bis 800 °C und alkali- oder erdalkalihaltige Wärmedämmstoffe, benennt gelbliche Ablagerungen aus überwiegend Calciumchromat als häufigsten Befund und bietet als einzige Handlung das Faserbindemittel an, mit den Sätzen, dieses reduziere das Chromat „zu unkritischen Chrom(III)-verbindungen" und binde Fasern, und: „Dadurch wird die Belastung herabgesetzt." Als einziger Vorbehalt folgt der Hinweis auf mögliche negative Einflüsse auf die behandelten Materialien und die Absprache mit dem Auftraggeber. Atemschutz, Zonierung, Absaugung, Schwarz-Weiß-Anlage, das Verbot der Wiederverwendung, die Gefährdungsbeurteilung, die Substitution und die TRGS 561 kommen auf der Seite nicht vor. Für die Schutzmaßnahmen verweist sie auf die federführende deutsche Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse. [117, 126]

Dieselbe Verkürzung tritt auf der industriellen Seite auf, dort mit demselben Wortfeld. Die deutschsprachige Produktseite von Eco-Point International BV zum Chrome-6 Neutralizer beschreibt das Mittel als säurebasierte, biologisch abbaubare Neutralisierungsflüssigkeit, „die schädliches Chrom-6 in unbedenkliches Chrom-3 umwandelt", und führt unter den besonderen Vorteilen an: „Chrom-6 wird in Chrom-3 umgewandelt, also von einem krebserzeugenden in einen unbedenklichen Stoff." Die Formulierung „das unbedenkliche Chrom-3" steht an zwei weiteren Stellen der Seite. Zur Einwirkzeit, zur Schutzausrüstung, zur Gefährdungsbeurteilung und zur Entsorgung enthält die Seite nichts. Auf die Prüfung wird mit dem Satz verwiesen, der Chrome-6-Neutralizer sei vom unabhängigen Labor SEEF getestet und zertifiziert; die Bedingungen, die dieses Zertifikat ausdrücklich nennt, stehen dort nicht. Die deutsche Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft mit „unkritischen Chrom(III)-verbindungen" und der Anbieter mit „unbedenkliches Chrom-3" treffen damit dieselbe Aussage. Der Befundstand zu Chrom(III) steht in Abschnitt 27, mit der Sensibilisierungsmarkierung Sh für die löslichen Chrom(III)-Verbindungen, der Bewertung der französischen Agentur Anses von 2021 und der Mobilisierung fasergebundenen Chrom(III) als Chrom(VI) nach Walter et al. 2022. [127, 116]

Als Bewertung: aus einem vollständigen Schutzregime wird in der öffentlichen Darstellung eine einzelne Maßnahme, versehen mit einer Wirkungsaussage, die weder in der Betriebsanweisung noch in der TRGS 561 steht und für die kein Wirksamkeitsnachweis verlangt wird. Ein Betrieb, der seine Pflichtenlage sucht, trifft zuerst auf diese Darstellung, weil sie der öffentliche Einstieg ist, während die Betriebsanweisung im Gefahrstoffinformationssystem aufgerufen werden muss. Die Frage, ob diese Verkürzung bei der Abfassung bedacht wurde, bleibt offen. Die Wirkung tritt unabhängig davon ein, und sie reicht weiter als jede Herstellerangabe, weil sie unter dem Zeichen einer Berufsgenossenschaft steht und damit zitierfähig ist.

Ein dritter Anbieter und der Prüfkreis

Dieselbe Aussage trägt ein dritter Anbieter. Die Produktseite von MATinspired B.V. zum TK20 Chromium-6 Neutralizer beschreibt das Mittel mit „neutralizes and removes chromium-6 in surface contaminations on metals" und erklärt die Wirkung damit, das vorhandene Chrom(VI) werde „converted to non-toxic chromium-3". Damit liegen drei gleichlautende Einstufungen des Reaktionsprodukts vor, unkritisch bei der deutschen Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, unbedenklich bei Eco-Point und non-toxic bei MATinspired. [131]

Die Fragen und Antworten desselben Anbieters nennen die Grenzen, die auf der Produktseite fehlen. Das Mittel wirkt nicht gegen luftgetragene Partikel, es setzt abgekühlte Bauteile voraus, es ist für Metall mit Spalten oder Bohrungen nicht vorgesehen, es soll höchstens etwa zehn Minuten einwirken und wird anschließend abgewischt und mit Wasser nachgespült. Zur Vollständigkeit der Umsetzung heißt es: „We cannot guarantee that the neutralizer liquid will remove/neutralizer all chromium-6." Zur Beständigkeit des Ergebnisses heißt es, eine Rückbildung sei bei Raumtemperatur nicht beobachtet worden, womit das behandelte und wieder eingebaute Bauteil bei Betriebstemperatur nicht erfasst ist. Zur Schutzausrüstung nennen die Antworten Schutzhandschuhe und Augenschutz als Mindestmaß, führen Atemschutz P3 und Schutzkleidung als Empfehlung und schließen mit dem Satz: „It is the sole responsibility of the user which appropriate security measures should be used." [132]

Der Nachweis der Wirkung ruht in beiden Dokumenten auf dem Testkit TK11 desselben Anbieters. Dasselbe Testkit ist in der Arbeitsanweisung von Vattenfall Generation NL das Kriterium, nach dem Schutzausrüstung abgelegt, Werkzeug zurückgegeben und benebeltes Isoliermaterial wieder eingebaut wird. Zu diesem Verfahren hält das Zertifikat der Prüfstelle fest, ein negatives Ergebnis sei nicht belastbar, und die französische Feldstudie zeigt denselben Befund mit 869 ng Chrom(VI) in der Laboranalytik am Turbolader gegen ein negatives Schnelltestergebnis an derselben Stelle (Abschnitt 19). [115, 116, 132]

Als Bewertung: ein Mittel, dessen vollständige Wirkung der Hersteller nicht zusichert, wird durch einen Test abgenommen, dessen negatives Ergebnis das unabhängige Labor für nicht belastbar erklärt, und die Auswahl der Schutzmaßnahmen wird dem Anwender übertragen, während die deutsche TRGS 561 sie für diesen Anwendungsfall in Abschnitt 5.9.3 Absatz 5 festlegt. Die Substitution des alkali- und erdalkalioxidhaltigen Materials, die die Neubildung beenden würde, kommt in keinem der Herstellerdokumente vor. [19]

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 Staubbindung 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. Chrom(III): der angenommene Endzustand

Alle in Abschnitt 26 behandelten Verfahren beruhen auf derselben Annahme. Mit der Umwandlung von Chrom(VI) in Chrom(III) sei der gefährliche Teil des Vorgangs beendet. Dieser Abschnitt prüft die Annahme an den Unterlagen, an den Einstufungen und an der Chemie des Vorgangs.

Die Argumentationsfigur in den Herstellerunterlagen

Die Technische Anweisung [redacted] von [redacted], Freigabe 31. Mai 2023, führt sie vollständig aus. Chrom(VI) werde durch die Reduktionslösung „almost completely converted into the much less dangerous chromium of oxidation state 3". Zur Bewertung dieses Zustands heißt es: „Cr-3, for example, is found in many foods. Daily intake levels in Europe are generally in a range where no health risk is expected. Whether Cr-3 is an essential trace element for humans at all has not been conclusively clarified. Since the possible concentration of Cr-3 after application of the reduction solution is far below the applicable limit values (occupational exposure limit values), a health hazard from Cr-3 can be ruled out." Hervorgehoben folgt: „Unlike Cr-6, Cr-3 is not carcinogenic." [25]

Der Absatz räumt im dritten Satz ein, dass die Essenzialität nicht abschließend geklärt ist, und schließt im vierten eine Gesundheitsgefahr aus. Die Begründung stützt sich auf Grenzwerte, ohne einen zu nennen. Die Essenzialitätsfrage ist durch die Bewertung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit von 2014 beantwortet, die keinen Beleg für eine Essenzialität von Chrom(III) fand und die Festlegung einer angemessenen Zufuhrmenge für nicht angebracht hielt. [61]

Was bei der Reduktion entsteht

Die MAK-Begründung zu den Chrom(VI)-Verbindungen der einatembaren Fraktion beschreibt den Vorgang als mehrstufige Reaktion: „Die Reduktion von Chrom(VI) verläuft über Chrom(V) und Chrom(IV) zu Chrom(III), wobei radikalische Sauerstoff- und Schwefelverbindungen entstehen." Welche Zwischenstufe auftritt, hängt vom Reduktionsmittel ab. Bei der Reaktion mit Ascorbat werden im ersten Schritt zwei Elektronen übertragen und Chrom(IV) entsteht, bei Glutathion wird ein Elektron übertragen und Chrom(V) gebildet, das in Reaktionen analog zur Fenton-Reaktion Hydroxylradikale produziert. Als Endprodukt entsteht in allen Fällen die stabile Oxidationsstufe Chrom(III). [128]

Diese Darstellung betrifft die Reduktion im Zellinneren. Ihre Übertragung auf die Behandlung einer Bauteiloberfläche ist eine Analogie und wird hier als solche gekennzeichnet. Übertragbar ist der Umstand, dass die Umwandlung keine Einschrittreaktion zu einem definierten Endstoff ist.

Für die Behandlung auf der Anlage kommt hinzu, was auf der Fläche liegt. Das Reduktionsmittel ist je nach Anweisung Ascorbinsäure, eine Säuremischung oder Eisen(II)-sulfat, teils kommt Zitronensäure hinzu. Auf der behandelten Fläche befinden sich Öle, Fette, Dämmstoffreste und Montagepasten. Chrom(III) bildet mit organischen Säuren und deren Oxidationsprodukten lösliche Komplexe. Chrom(III)-oxid, das in den Produktaussagen gemeint ist, entsteht thermisch und nicht durch Aufsprühen und Abwischen.

Die unbekannte Spezies

Welche Chrom(III)-Verbindungen nach einer Behandlung tatsächlich vorliegen, wird in keinem der betrachteten Dokumente angegeben. Die Arbeitsanweisung von Vattenfall Generation NL benennt das Reaktionsprodukt nicht, die Produktseiten von Eco-Point und MATinspired sprechen von Chrom-3 und non-toxic chromium-3 ohne Angabe einer Verbindung, das Zertifikat der Prüfstelle bezieht sich auf die Wirksamkeit der Umwandlung und nicht auf deren Produkt, und die Seite der deutschen Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft spricht im Plural von unkritischen Chrom(III)-verbindungen, ohne eine zu nennen. [115, 116, 117, 131, 132]

Die eingesetzte Analytik beantwortet die Frage ebenfalls nicht. Der kolorimetrische Schnelltest zeigt Chrom(VI) an oder nicht. Die Laborverfahren bestimmen Chrom(VI) oder Gesamtchrom. Eine Speziesanalytik der entstandenen Chrom(III)-Verbindungen ist in keinem der Verfahren vorgesehen und wird in keinem der Dokumente verlangt.

Einstufung der Chrom(III)-Verbindungen

Die MAK- und BAT-Werte-Liste 2026 der Deutschen Forschungsgemeinschaft führt die Chrom(III)-Verbindungen ohne MAK-Wert, ohne Spitzenbegrenzung, ohne Schwangerschaftsgruppe, ohne Hautresorptionsmarkierung und ohne Kategorie für Krebserzeugung oder Keimzellmutagenität. Unter Sensibilisierung trägt die Gruppe die Markierung Sh für hautsensibilisierende Wirkung, mit dem Zusatz: „Gilt nicht für Chrom(III)-oxid und vergleichbar schwerlösliche Chrom(III)-Verbindungen." Zum Vergleich führt dieselbe Liste die Chrom(VI)-Verbindungen der einatembaren Fraktion mit der Hautresorptionsmarkierung H, der Sensibilisierungsmarkierung Sh, der Krebserzeugungskategorie 1 und der Keimzellmutagenitätskategorie 2. [102]

Die Markierung Sh gilt damit für die löslichen Chrom(III)-Verbindungen und ausdrücklich nicht für das Oxid und vergleichbar schwerlösliche Verbindungen. Die Zuordnung zu der Gruppe ohne Markierung setzt die Kenntnis der entstandenen Spezies voraus, die nach dem vorigen Unterabschnitt nicht erhoben wird. Sie erfolgt in der Darstellung der Anbieter ohne Befund.

Für Chrom(III)-oxid selbst gilt in Deutschland ein Arbeitsplatzgrenzwert von 2 mg/m³ in der einatembaren Fraktion mit dem Überschreitungsfaktor 1 und der Kurzzeitwertkategorie I. Eine harmonisierte Einstufung nach der europäischen CLP-Verordnung liegt für Chrom(III)-oxid nicht vor. [130]

Die französische Agentur Anses hat Chrom(III)-oxid im Rahmen der Stoffbewertung nach der REACH-Verordnung als bewertender Mitgliedstaat untersucht und ihre Stellungnahme am 28. Juli 2021 vorgelegt. Sie hält eine Einstufung als Hautsensibilisator der Kategorie 1 für angezeigt und sieht dies ausdrücklich auch für andere Chrom(III)-Verbindungen als relevant. Für den Inhalationsweg soll eine harmonisierte Einstufung als STOT RE 2 mit H373 geprüft werden, weil die Lungenschäden im Tierversuch als irreversibel gelten. Für die Umwelt empfiehlt sie die harmonisierte Einstufung als Aquatic Acute 1 mit H400 und Aquatic Chronic 1 mit H410. Für die Keimzellmutagenität kommt sie zu dem Ergebnis, dass die Kriterien der CLP-Verordnung nach Gesamtbewertung nicht erfüllt sind; zu den Nanoformen liegen zwei Studien mit Bedenken vor, deren Aussagekraft durch fehlende Angaben zum Chrom(VI)-Gehalt eingeschränkt ist. Zur Reproduktionstoxizität hält sie die Datenlage für unzureichend und empfiehlt die Anordnung einer Mehrgenerationenstudie nach OECD 443 und einer pränatalen Entwicklungsstudie nach OECD 414. [129]

Dieselbe Stellungnahme hält fest, dass das europäische Einstufungs- und Kennzeichnungsverzeichnis für Chrom(III)-oxid Selbsteinstufungen unter anderem als Carc. 1A, Muta. 1B und Repr. 2 enthält, die teilweise mit Chrom(VI)-Verunreinigungen zusammenhängen, und empfiehlt den Überwachungsbehörden zu prüfen, ob Chrom(VI) über 0,1 Prozent ohne passende Einstufung enthalten ist. [129]

Zwischen der deutschen und der französischen Bewertung besteht ein offener Punkt. Die MAK- und BAT-Werte-Liste nimmt Chrom(III)-oxid von der Sh-Markierung aus, die Anses hält für denselben Stoff eine Einstufung als Hautsensibilisator Kategorie 1 für angezeigt. Beide Bewertungen stehen nebeneinander. [102, 129]

Der sensibilisierende Schritt ist der Chrom(III)-Schritt

Die MAK-Begründung beschreibt den Ablauf der Hautsensibilisierung durch Chromate. Chrom(VI)-Verbindungen penetrieren die Hornschicht und werden in der Haut zu Chrom(III) reduziert, wahrscheinlich vor allem durch schwefelhaltige Aminosäuren und Glutathion. „Diese dreiwertigen Chromverbindungen sind im Unterschied zu den sechswertigen in der Lage, an hochmolekulare Carriermoleküle wie Proteine zu binden und können als Haptene fungieren" und so eine Sensibilisierung der Haut induzieren. Auch bei der Genotoxizität ist das dreiwertige Chrom beteiligt: im Zellkern entstandenes Chrom(III) bildet Addukte mit der DNA, „überwiegend um ternäre Komplexe aus DNA, Chrom(III) und kleinen Molekülen wie Ascorbat, Glutathion, Cystein oder Histidin", die Genmutationen, DNA-Doppelstrangbrüche, Chromosomenbrüche und Mikronuklei verursachen können. [128]

Der Präzedenzfall Leder

Dieselbe MAK-Begründung beschreibt einen Anwendungsfall, in dem Chrom(III) seit langem als Arbeitsstoff eingesetzt wird: „Die Gerbung erfolgt zwar mit Chrom(III)-Verbindungen, aus diesen können aber bei ungeeigneten Verarbeitungs- oder Lagerungsmethoden geringe Mengen Chrom(VI)-Verbindungen entstehen. Wird das Chrom(III) in situ durch Reduktion von Chrom(VI)-Verbindungen gebildet, kann bei unvollständiger Reduktion ebenfalls lösliches Chrom(VI) im Leder verbleiben." [128]

Beide Aussagen dieses Satzes betreffen den hier behandelten Vorgang. Aus Chrom(III) kann unter ungeeigneten Bedingungen Chrom(VI) entstehen, und eine unvollständige in situ-Reduktion lässt lösliches Chrom(VI) zurück. Für die Behandlung am Heißteil ist die Vollständigkeit der Reduktion nach den Angaben der Anbieter selbst nicht zugesichert.

Beweglichkeit und die Folgerung auf abflussfreies Arbeiten

Die Verfahren nach Abschnitt 26 arbeiten nass. Aufgesprüht wird eine Lösung, abgewischt wird mit Tüchern, nachgespült wird nach der Anweisung von MATinspired mit Wasser. Damit entsteht eine Flüssigphase, die nach dem Stand der Anbieterangaben weiterhin Chrom(VI) enthalten kann, weil die vollständige Umsetzung nicht zugesichert ist und das Freigabeverfahren im negativen Ergebnis nach dem Zertifikat der Prüfstelle nicht belastbar ist. Hinzu kommen die löslichen Chrom(III)-Komplexe, deren Zusammensetzung nicht bestimmt wird. [132, 116]

Zur Entsorgung dieser Flüssigphase enthalten die Produktseiten und die Fragen und Antworten von MATinspired keine Angabe, und das Waschen der benutzten Tücher ist dort ausdrücklich vorgesehen. Die Betriebsanweisung der deutschen Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft verlangt für dieselbe Tätigkeit die Sammlung der Abfälle am Entstehungsort in PE-Säcke oder Big-Bags und deren Kennzeichnung. Aus beidem folgt die Anforderung, solche Arbeiten abflussfrei auszuführen und die anfallende Flüssigkeit als Gefahrstoffabfall zu behandeln, solange ihr Chrom(VI)-Gehalt nicht mit einem belastbaren Verfahren bestimmt ist. [126, 132]

Die Rückkehr des offenen Chrom(III) an das Heißteil

Im Legierungsverbund ist Chrom gebunden und für eine Reaktion nur über die Oberfläche zugänglich. Nach einer Reduktion liegen Chrom(III)-Verbindungen fein verteilt und ungebunden auf der Oberfläche und im anhaftenden Material vor. Dieser Zustand ist der Ausgangszustand der Chromatbildung, wie sie in dieser Analyse belegt ist: das Patent von 1939 beschreibt die gezielte Erzeugung von Calciumchromat aus chromhaltigem Material mit Kalk und Luftsauerstoff, Mao et al. weisen die Bildung von Calciumchromat aus Chrom(III) in Gegenwart von Calciumoxid im Temperaturfenster von 500 bis 900 °C nach, und Verbinnen et al. zeigen dieselbe Abhängigkeit für Alkali- und Erdalkaliverbindungen. [1, 9, 10]

Wird behandeltes Dämmmaterial nach der Anweisung von Vattenfall Generation NL wieder eingebaut und die Anlage hochgefahren, sind alle Bedingungen erneut erfüllt, und der Reaktionspartner Chrom liegt in einer leichter zugänglichen Form vor als zuvor. Eine Untersuchung dieses Falls liegt nicht vor. Die Anbieterangabe, eine Rückbildung sei bei Raumtemperatur nicht beobachtet worden, erfasst ihn nicht. [115, 132]

Abgrenzung

Die geringere Toxizität der Chrom(III)-Verbindungen gegenüber den Chrom(VI)-Verbindungen ist unbestritten und wird hier nicht in Frage gestellt. Chrom(III)-Verbindungen tragen keine Krebserzeugungskategorie und keine Keimzellmutagenitätskategorie. Die Aussagen, das Reaktionsprodukt sei unkritisch, unbedenklich oder non-toxic, gehen darüber hinaus. Sie treffen eine Aussage über Stoffe, die nicht bestimmt werden, sie lassen die Sh-Markierung der löslichen Chrom(III)-Verbindungen unerwähnt, sie lassen die behördliche Bewertung eines Mitgliedstaats zur Hautsensibilisierung und zur Gewässergefährdung unerwähnt, und sie setzen eine Vollständigkeit der Umwandlung voraus, die kein Anbieter zusichert.

28. 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.

29. 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 Bildungsweg nicht auf. Dieser ist seit 1939 patentförmig dokumentiert, an der Metall-Dämmstoff-Grenzfläche experimentell bestätigt und seit April 1990 Gegenstand von Herstellerwarnungen. Er ist zugleich Betriebsrealität: Die Arbeitsanweisungen der Betreiber beschreiben ihn mit Temperaturfenster und Calciumquelle, und die eigenen Feldbefunde aus sieben Jahren bestätigen ihn an Motoren, Turbinen, Kraftwerken, Schiffen und Fahrzeugen. Die offenen Fragen betreffen die Ausprägung, nicht das Auftreten.

Dargestellt wird die In-situ-Bildung gleichwohl weiterhin als Verunreinigung oder als nicht zu verhindernde Folge des Betriebs. Zutreffend ist, dass es sich um eine thermochemische Reaktion handelt, deren zweiter Partner über die Materialwahl bestimmt wird. Wer ein alkali- und erdalkalioxidhaltiges Material auf ein chromlegiertes Heißteil setzt, nimmt die Bildung in Kauf, und zwar seit die Zusammenhänge dokumentiert sind.

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, dermaler 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.

30. 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 Strafrahmen 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 µg/m³ und einem Action Level von 2,5 µg/m³ (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 Heißteil 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.

31. Zur Auswahl des zitierten Regelwerks

In dieser Analyse wird häufig deutsches Regelwerk zitiert, insbesondere die TRGS 561 und die Gefahrstoffverordnung. Dafür gibt es zwei Gründe. Ich arbeite von Deutschland aus, gemeinsam mit einem weiteren Chromatexperten, der im Arbeits- und Umweltschutz tätig ist. Und die deutsche TRGS 561 beschreibt den hier behandelten Anwendungsfall ausdrücklich, mit thermisch beanspruchten chromlegierten Industriekomponenten, mit Alkali- und Erdalkalimetalloxiden aus Dämmstoffen und Montagepasten und mit einem eigenen Maßnahmenkatalog. [19]

Strengere Maßstäbe als das europäische Recht setzt sie damit nicht. Sie formuliert den Ansatz der Richtlinie 2004/37/EG für diesen Fall aus. Die Richtlinie verlangt seit über zwanzig Jahren, bei allen Tätigkeiten mit der Möglichkeit einer Exposition Art, Ausmaß und Dauer der Exposition zu ermitteln und dabei die weiteren Expositionswege einschließlich der Aufnahme in oder über die Haut zu berücksichtigen. Sie gilt in allen Mitgliedstaaten. [18]

In der Praxis stützt sich die Beurteilung überwiegend auf Luftmessungen, weil die verbindlichen Werte als Luftkonzentrationen festgelegt sind. Für die Gefährdung durch Hautkontakt besteht in Deutschland mit der TRGS 401 ein eigenes Beurteilungsverfahren, das neben der Luftmessung steht. [99]

Chrom(VI)-Verbindungen sind in dieser Hinsicht ungewöhnlich. Die MAK- und BAT-Werte-Liste 2026 führt sie mit der Hautresorptionsmarkierung H, der Sensibilisierungsmarkierung Sh, der Krebserzeugungskategorie 1 und der Keimzellmutagenitätskategorie 2. Nach Tabelle 2 der deutschen TRGS 401 ergibt die Verbindung aus Hautresorption und Einstufung als karzinogen Kategorie 1 bei jeder Kontaktart eine hohe Gefährdung, ohne Schwelle für Dauer oder Fläche. Calcium- und Natriumchromat sind zusätzlich als sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung eingestuft. Damit liegen vier Beurteilungsebenen nebeneinander, inhalativ, dermal, oral und umweltseitig. Asbest trägt weder einen hautbezogenen Gefahrenhinweis noch eine Gewässergefährdung. [102, 99, 98]

Für die Luftmessung folgt daraus eine praktische Grenze. Chromathaltige Staubnester in Dämmungen, an Flanschen und in Hohlräumen werden erst beim Hantieren freigesetzt. Eine allgemeine Raumluftmessung erfasst sie nicht. Die deutsche TRGS 561 setzt deshalb unter 5.9.3 Absatz 5 bei der Tätigkeit an und verlangt die Minimierung der Staubentstehung und -ausbreitung bis hin zum Abdecken von Gitterrosten, dazu Chemikalienschutzanzug Typ 5 mit Kapuze, nitrilbeschichtete Textilhandschuhe, Augenschutz, Atemschutz mindestens FFP2 und bei länger andauernden Tätigkeiten Halbmasken mit P3-Filtern sowie die Entsorgung kontaminierter Einwegschutzkleidung. [19]

Dasselbe gilt für chromathaltige Aschen bei der Revision im Inneren von Verbrennungsöfen. Dort werden Gerüste eingebaut, und die Edelstahlkomponenten des Rostes werden nicht nur begangen und inspiziert, sondern auch oberflächenbehandelt, ausgebaut und ersetzt. Aus eigener Feldarbeit sind erhöhte Luftbelastungen durch Chrom(VI)-Verbindungen bei solchen Arbeiten bekannt; die zugehörigen Messwerte sind nicht öffentlich und werden hier nicht wiedergegeben.

Eine einzelne Messung taugt dort ohnehin nicht als Maßstab, weder zur Entlastung noch zur Belastung. Der Gehalt an basischen Oxiden im Brenngut schwankt, und er wird nicht allein durch die Abfallzusammensetzung bestimmt. Paoletti gibt den Calciumoxidgehalt im Hausmüll mit rund 3 Prozent an und beschreibt auf dieser Grundlage die Bildung von Calciumchromat zwischen 500 und 850 °C bei ausreichendem Sauerstoffpartialdruck. Hinzu kommt die Zugabe calciumhaltiger Sorbentien im Anlagenbetrieb. Bei der konditionierten Trockensorption geschieht das hinter dem Kessel, bei Rauchgastemperaturen von etwa 130 bis 150 °C, bei Sprühabsorption mit Kalkmilch zwischen 140 und 200 °C, und damit außerhalb des Bildungsfensters. Bei der Direktentschwefelung dagegen wird Calciumhydroxid oder Kalksteinmehl in den Feuerraum bei etwa 900 °C oder in die nachgeschalteten Kesselzüge bei etwa 350 °C eingebracht, in der dokumentierten Anwendung mit Dosierraten von 140 bis 375 Kilogramm je Stunde. Für die Beurteilung einer Revision ist deshalb zu klären, welches Entschwefelungsverfahren die Anlage fährt und an welcher Stelle das Sorbens eingebracht wird. [50, 149, 150]

Was die Luftmessung nicht abbildet: der Handbefund der französischen Feldstudie

Die französische Feldstudie misst nicht nur Oberflächen, sondern auch Hände. Vor dem Ausbau lag der Wert unter der Bestimmungsgrenze von 40 ng, nach dem Ausbau bei 45,4 ng, und die Autoren halten die Kontamination der Hände trotz getragener Einweg-Nitrilhandschuhe ausdrücklich fest. Getragen wurden außerdem Einweg-Halbmasken FFP3 und eine Arbeitskombination Typ 5. Im selben Durchgang blieben die Luftwerte niedrig, und die Urinwerte der elf untersuchten Mechaniker lagen im Mittel bei 0,26 µg je Gramm Kreatinin und damit unterhalb des biologischen Referenzwerts von 0,54. Die dermale Exposition wird von der Luftmessung und vom Biomonitoring in dieser Konstellation nicht abgebildet. [5]

Der Handschuh ist dabei nicht die schwache Stelle. Der Nitrilhandschuh trennt die Haut vom Stoff; offen bleiben der Ärmelabschluss, über den Staub eindringt, und der Moment des Ausziehens, in dem die kontaminierte Außenseite die Innenhand berührt. In der Praxis wird deshalb der Übergang zwischen Handschuh und Anzugärmel abgeklebt, ebenso der Übergang zwischen Anzug und Schuhwerk. Bei Schutzanzügen der Typen 5 und 6 gehören abgedichtete Nähte und überdeckte Verschlüsse zu den Produktmerkmalen, und die beiden abgeklebten Übergänge schließen die Stellen, die das Produkt selbst nicht schließen kann. Die deutsche DGUV-Regel 112-189 hält dazu allgemein fest, dass nur geschlossene Kleidung die Schutzfunktion erfüllt, und führt für das Risiko der Kontamination die Dichtheit als Anforderung an die Schutzkleidung auf. Die Autoren der französischen Studie ziehen aus ihrem Befund dieselbe Richtung und empfehlen ausdrücklich, die Protokolle zum Ablegen der persönlichen Schutzausrüstung und zum Händewaschen vor und nach dem Tragen zu verbessern. [5, 133]

Dieselbe Untersuchung fand in den beprobten Isoliermaterialien Chrom(VI)-Spuren von 0,01 bis 0,2 mg/kg sowie in einer Probe keramische Feuerfestfasern, die als karzinogen Kategorie 1B beim Einatmen eingestuft sind. Die übrigen Proben bestanden aus Glas- oder Silikatfasern. [5]

Die Richtung der Entwicklung zeigt Australien. Ab dem 1. Dezember 2026 gibt Safe Work Australia für nicht schwellenwertbasierte genotoxische Karzinogene keine Arbeitsplatzgrenzwerte mehr aus, Chrom(VI)-Verbindungen eingeschlossen. An die Stelle des Grenzwerts tritt die Pflicht, die Exposition zu beseitigen oder so weit wie vernünftigerweise praktikabel zu minimieren. [58]

32. Größenordnung: ein Gedankenversuch

Dieser Abschnitt rechnet nicht, wie viele Anlagen belastet sind. Diese Zahl ist nirgends erhoben, und jede Angabe dazu wäre erfunden. Gerechnet wird, wie oft die Situation vorkommt, in der zu prüfen wäre, ob eine Chrom(VI)-Belastung auszuschließen ist. Die Bestandszahlen stammen aus öffentlichen Angaben der Hersteller, aus Flottenstatistiken und aus Anlagenregistern. Die Umrechnungen und Intervallannahmen sind im Text gekennzeichnet.

Bestandszahlen aus öffentlichen Quellen

Caterpillar gibt für die Baureihe 3500 einen Feldbestand von 190.000 Motoren und 3 Milliarden Betriebsstunden an, bei über 35 Jahren Produktionszeit, mit Anwendungen in Bergbau, Schiene, Stromerzeugung, Öl und Gas sowie Schifffahrt. Stand September 2016. [134]

Rolls-Royce Power Systems nennt für die mtu-Baureihen 2000 und 4000 über 100.000 verkaufte Motoren, davon 52.000 der Serie 4000 und über 65.000 der Serie 2000, zusammen über 320 Millionen Betriebsstunden, mit Anwendungen in Stromaggregaten, Muldenkippern, Yachten, Fähren und Lokomotiven. Stand 2021. [135]

INNIO weist zum 31. Dezember 2025 eine aktive installierte Basis der Marken Jenbacher und Waukesha von rund 44 GW aus, nach 42 GW im Vorjahr, bei 3,4 GW Auslieferung im Jahr 2025. Stückzahlen nennt das Unternehmen nicht. Bei einer angesetzten mittleren Einheitenleistung von 1,0 bis 1,5 MW entspricht das 29.000 bis 44.000 Motoren. [136]

Wärtsilä gibt für den Energiebereich 79 GW gelieferte Kraftwerksleistung in 180 Ländern an, davon 40,8 GW im Nahen Osten und in Asien, 19,7 GW in Amerika, 10,9 GW in Europa und 7,6 GW in Afrika. Das Schiffsgeschäft ist darin nicht enthalten. Stückzahlen nennt das Unternehmen nicht. [137]

GE Vernova nennt auf der eigenen Produktseite über 7.000 Gasturbinen mit mehr als 800 GW installierter Leistung in über 120 Ländern und gibt an, ungefähr die Hälfte der weltweit installierten Gasturbinenbasis zu stellen. Daraus ergibt sich eine weltweite Flotte in der Größenordnung von 14.000 Gasturbinen. Einzelne Baureihen zum Vergleich: 7F mit über 950 installierten Einheiten und rund 175 GW, 9F mit über 400 Einheiten in mehr als 40 Ländern, LM6000 mit über 1.500 verkauften Einheiten. [138]

Der Global Coal Plant Tracker weist über 2.200 GW Kohlekapazität in Betrieb aus, Erfassungsschwelle 30 MW. Bei einer mittleren Blockgröße von 300 MW sind das rund 7.300 Blöcke mit Dampfturbine sowie Frischdampf- und Zwischenüberhitzerleitungen aus warmfesten chromlegierten Stählen. Der Global Oil and Gas Plant Tracker führt 16.559 Öl- und Gaskraftwerksblöcke, einschließlich geplanter und stillgelegter, Erfassungsschwelle 50 MW und in der Europäischen Union sowie im Vereinigten Königreich 20 MW. [139, 140]

Die Welthandelsflotte umfasst rund 109.000 Schiffe ab 100 Bruttoregistertonnen, jeweils mit gedämmter Abgasanlage für Haupt- und Hilfsmotoren. [141]

Die ACEA weist für die Europäische Union 6.162.673 Lkw über 3,5 Tonnen mit 96,3 Prozent Dieselanteil und 699.238 Busse mit 88,7 Prozent aus, bei einem Durchschnittsalter der Lkw-Flotte von 14,0 Jahren. Für Europa einschließlich EFTA und Vereinigtem Königreich sind es 7.072.260 Lkw und 852.180 Busse, dazu 302.281.600 Pkw. Das Durchschnittsalter verweist auf die Abgasstufen Euro V und Euro VI, also auf Fahrzeuge mit Oxidationskatalysator, Partikelfilter und SCR-Strecke, sämtlich gedämmte Heißteile aus chromlegiertem Stahl. [142]

In der Abfallverbrennung führt Europa 498 Anlagen, Stand 2022, darunter Frankreich 116, Deutschland 91, das Vereinigte Königreich 57, Italien 36 und die Niederlande 12. Für die Vereinigten Staaten sind 75 Anlagen ausgewiesen. China betrieb zum Jahresende 2023 975 Anlagen mit 2.151 Verbrennungslinien bei einer Kapazität von 327 Millionen Tonnen im Jahr. Japan führte im Geschäftsjahr 2024 991 Anlagen, davon 415 mit Stromerzeugung. In diesen vier Regionen zusammen sind das 2.539 Anlagen. Überträgt man das chinesische Verhältnis von 2,2 Linien je Anlage, liegt die Zahl der Verbrennungslinien bei rund 5.600. [144, 145, 146, 147]

Anlässe pro Jahr

Für Gasmotoren nennt ein Jenbacher-Servicebetrieb Zwischenwartungen alle 10.000 Betriebsstunden und Überholungen bei 30.000 und 60.000 Betriebsstunden. Bei konservativ angesetzten 5.000 Betriebsstunden im Jahr ergibt das eine Überholung alle sechs Jahre, für die oben genannte Flotte also 4.800 bis 7.300 Ereignisse pro Jahr. [148]

Für Kohleblöcke ergibt eine Revision alle zwei Jahre rund 3.650 Ereignisse pro Jahr. Für Verbrennungslinien ergibt eine Revision je Linie und Jahr rund 5.600 Ereignisse. Für Schiffe ergibt eine Maßnahme an der Abgasstrecke alle zweieinhalb Jahre rund 44.000 Ereignisse. Für Nutzfahrzeuge in der Europäischen Union ergibt ein Werkstattaufenthalt je Fahrzeug und Jahr rund 6,9 Millionen Aufenthalte, bei 250 Werktagen etwa 27.000 je Werktag.

Für Pkw weist die Deutsche Automobil Treuhand 0,35 Reparaturen je Fahrzeug und Jahr aus, 2022 waren es 0,40 und 2019 noch 0,51; Wartungen und Inspektionen sind in dieser Zahl nicht enthalten. Bezogen auf die 255.999.373 Pkw in der Europäischen Union sind das rund 90 Millionen Reparaturen im Jahr oder 358.000 je Werktag. Welcher Anteil davon den Motorraum oder die Abgasanlage berührt, ist nicht erhoben. [143, 142]

Die Annahmen in diesem Abschnitt

Angesetzt wurden eine mittlere Einheitenleistung bei Gasmotoren, eine mittlere Blockgröße bei Kohlekraftwerken, die Zahl der Verbrennungslinien je Anlage außerhalb Chinas, die jährlichen Betriebsstunden, das Revisionsintervall bei Kraftwerken, Verbrennungslinien und Schiffen sowie die Werkstatthäufigkeit bei Nutzfahrzeugen. Die Herstellerzahlen von Caterpillar und Rolls-Royce sind kumulierte Feld- und Verkaufszahlen und keine aktive Flotte. Nicht jede genannte Anwendung führt eine Dämmung im betroffenen Temperaturfenster. Die Segmente werden nicht addiert, weil sie unterschiedliche Zähleinheiten haben und sich überschneiden; die Schiffsmotoren etwa sind in den Herstellerzahlen teilweise bereits enthalten.

Was daraus folgt

Die angesetzten Ereignisse in den vier industriellen Segmenten summieren sich auf etwa 58.000 bis 61.000 im Jahr, noch ohne Abzug der Überschneidungen. Hinzu kommen rund 6,9 Millionen Werkstattaufenthalte bei Nutzfahrzeugen und rund 90 Millionen Pkw-Reparaturen in der Europäischen Union, deren einschlägiger Anteil nicht beziffert ist.

Zur Beurteilung steht damit kein vereinzelter Vorgang. Die Freisetzung findet täglich statt, in Motorräumen, an Fahrzeugen, auf Turbinen, in Kraftwerken und in Verbrennungsanlagen, in einer Zahl, die sich nicht beziffern lässt, und überwiegend unbeachtet. Ausgelöst wird sie durch den Stoff, der dieser Analyse den Titel gibt.

Jeder dieser Anlässe wäre in Deutschland eine Tätigkeit im Sinne des Abschnitts 5.9.3 Absatz 5 der deutschen TRGS 561. In den übrigen betrachteten Rechtsräumen folgt die Pflicht zur Beurteilung vor Arbeitsbeginn aus den in Abschnitt 25 genannten Vorschriften. Ein Schwellenwert, unterhalb dessen das Schutzregime entfiele, besteht in keiner dieser Ordnungen. Ein Ausschluss der Belastung ist mit den verbreiteten Verfahren nicht belastbar zu führen, weil der kolorimetrische Schnelltest falsch negativ ausfallen kann und für die Dämmstoffmatrix keine genormte Methode existiert (Abschnitte 17 und 19). [19]

33. Die Pflichtenlage in Deutschland

Abschnitt 31 nennt die Gründe, aus denen in dieser Analyse überwiegend deutsches Regelwerk zitiert wird. Dieser Abschnitt stellt die geltenden deutschen Vorschriften an einer Stelle zusammen und gibt zu jeder Aussage die Fundstelle an. Er wiederholt dabei Punkte, die an anderer Stelle im Zusammenhang stehen, damit ein Betrieb in Deutschland die Pflichtenlage nicht aus der gesamten Analyse zusammensuchen muss.

Der Gefahrstoffbegriff erfasst auch, was erst entsteht

Die deutsche Gefahrstoffverordnung knüpft nicht an den Einkauf an. § 2 Absatz 1 Nummer 3 zählt zu den Gefahrstoffen „Stoffe, Gemische und Erzeugnisse, aus denen bei der Herstellung oder Verwendung Stoffe nach Nummer 1 oder Nummer 2 entstehen oder freigesetzt werden". Nummer 4 erfasst ergänzend Stoffe und Gemische, die wegen ihrer Eigenschaften und der Art und Weise, wie sie am Arbeitsplatz vorhanden sind oder verwendet werden, die Gesundheit und die Sicherheit der Beschäftigten gefährden können. Ein Chromat, das an der Grenzfläche zwischen Dämmung und Heißteil entsteht, ist damit erfasst, obwohl es niemand gekauft und niemand herstellen wollte. [179]

Der Tätigkeitsbegriff ist ebenso weit. § 2 Absatz 5 Satz 1 nennt „jede Arbeit mit Stoffen, Gemischen oder Erzeugnissen, einschließlich Herstellung, Mischung, Ge- und Verbrauch, Lagerung, Aufbewahrung, Be- und Verarbeitung, Ab- und Umfüllung, Entfernung, Entsorgung und Vernichtung". Ausbau, Lagerung, Wiedereinbau und Entsorgung einer kontaminierten Dämmung sind damit Tätigkeiten im Sinne der Verordnung. [179]

Die Gefährdungsbeurteilung beginnt deshalb mit einer Feststellung und nicht mit einer Messung. § 6 Absatz 1 Satz 1 verlangt vom Arbeitgeber festzustellen, „ob die Beschäftigten Tätigkeiten mit Gefahrstoffen ausüben oder ob bei Tätigkeiten Gefahrstoffe entstehen oder freigesetzt werden können". § 6 Absatz 5 Satz 1 und 2 nennt die hier einschlägige Fallgruppe ausdrücklich: zu berücksichtigen sind Tätigkeiten, bei denen auch nach Ausschöpfung sämtlicher technischer Schutzmaßnahmen die Möglichkeit einer Gefährdung besteht, und dies gilt „insbesondere für Instandhaltungsarbeiten, einschließlich Wartungsarbeiten". Für Stoffe ohne Lieferanteneinstufung verlangt § 6 Absatz 3 Satz 1 die eigene Einstufung durch den Arbeitgeber. [179]

Erkundung vor Arbeitsbeginn und die Pflichten des Veranlassers

Seit dem 5. Dezember 2024 enthält die Verordnung in § 5a eine eigene Vorschrift für den Veranlasser von Tätigkeiten an baulichen oder technischen Anlagen. Er hat vor Beginn der Tätigkeiten dem ausführenden Unternehmen alle ihm vorliegenden Informationen zur Bau- oder Nutzungsgeschichte über vorhandene oder vermutete Gefahrstoffe schriftlich oder elektronisch zur Verfügung zu stellen, und er hat sich dafür in zumutbarem Aufwand der ihm zugänglichen Unterlagen zu bedienen. Satz 3 bestimmt, dass Gefahrstoffe im Sinne dieser Vorschrift solche sind, „die durch die Tätigkeiten freigesetzt werden und zu einer besonderen Gesundheitsgefährdung führen können". [180]

Auf der Seite des ausführenden Unternehmens steht § 6 Absatz 2c. Ist eine technische Erkundung erforderlich, um festzustellen, ob Gefahrstoffe bei den Tätigkeiten an baulichen oder technischen Anlagen freigesetzt werden und eine Gesundheitsgefährdung darstellen können, so ist diese Erkundung „eine Voraussetzung für die Durchführung der Tätigkeiten". Das Fehlen einer Untersuchung ist damit kein Zustand, in dem gearbeitet werden darf. [180]

Der Wortlaut lautet „bauliche oder technische Anlagen". Ob Fahrzeuge, Schiffe und Lokomotiven darunter fallen, sagt die Verordnung nicht, und eine Auslegungshilfe dazu habe ich nicht gefunden. Für ortsfeste Anlagen, also für Blockheizkraftwerke, Kessel, Rohrleitungen und Turbinen, stellt sich die Frage nicht. [180]

Die Gefährdungsbeurteilung ist vor Aufnahme der Tätigkeit zu dokumentieren und darf nach § 6 Absatz 11 Satz 1 nur von fachkundigen Personen durchgeführt werden. § 6 Absatz 8 Satz 2 Nummer 5 verlangt in der Dokumentation „eine Begründung, wenn bei Tätigkeiten mit krebserzeugenden oder keimzellmutagenen Gefahrstoffen der Kategorie 1A oder 1B Beschäftigte nicht in das Expositionsverzeichnis nach § 10a Absatz 1 Satz 1 aufgenommen wurden". Die Nichtaufnahme ist also begründungspflichtig. [179]

Substitution und Rangfolge der Maßnahmen

§ 7 Absatz 3 verlangt, auf der Grundlage des Ergebnisses der Substitutionsprüfung „vorrangig eine Substitution durchzuführen", und zwar durch Stoffe, Gemische, Erzeugnisse oder Verfahren, die unter den jeweiligen Verwendungsbedingungen nicht oder weniger gefährlich sind. § 7 Absatz 4 ordnet die weiteren Stufen: Gestaltung der Verfahren und emissionsarme Verwendungsformen nach dem Stand der Technik, danach kollektive technische Maßnahmen an der Gefahrenquelle und organisatorische Maßnahmen, und erst danach individuelle Maßnahmen einschließlich persönlicher Schutzausrüstung. § 7 Absatz 5 Satz 2 bestimmt, dass die Verwendung belastender persönlicher Schutzausrüstung keine Dauermaßnahme sein darf. [179]

Für krebserzeugende Stoffe der Kategorie 1A oder 1B verschärft § 10 Absatz 1 diese Reihenfolge. Ist eine Substitution technisch nicht möglich, hat der Arbeitgeber die Herstellung und Verwendung in einem geschlossenen System sicherzustellen; ist auch das technisch nicht möglich, hat er die Exposition nach dem Stand der Technik zu minimieren. § 10 Absatz 4 benennt die Fälle, in denen persönliche Schutzausrüstung zu tragen ist, darunter Tätigkeiten im Bereich hohen Risikos und eine wesentlich erhöhte Exposition gegenüber Gefahrstoffen ohne Arbeitsplatzgrenzwert oder Toleranzkonzentration. [179]

Die deutsche TRGS 561 setzt diese Rangfolge für den hier behandelten Fall um. Abschnitt 4.1 Absatz 1 verlangt die Substitutionsprüfung und nennt ausdrücklich die Prüfung, „ob pulverförmige Materialien durch weniger staubende ersetzt werden können". Abschnitt 4.2 Absatz 1 Satz 1 bezeichnet Maßnahmen zur Vermeidung und Verringerung des Staubaufkommens als „zwingend notwendig". Abschnitt 5.9.3 Absatz 5 knüpft das ergänzende Schutzregime an Tätigkeiten an Industriekomponenten, „an denen eine Chrom(VI)-Belastung vorliegt oder bei denen diese nicht auszuschließen ist". [19]

Der Wert von 1 µg/m³ und was er nicht leistet

Für Chrom(VI)-Verbindungen besteht in Deutschland kein Arbeitsplatzgrenzwert. Die TRGS 910 führt in Tabelle 1 eine Toleranzkonzentration von 1 µg/m³ für die einatembare Fraktion mit dem Überschreitungsfaktor 8 und der Bemerkung „siehe TRGS 561"; eine Akzeptanzkonzentration ist für diesen Eintrag nicht festgelegt. Die Konzentration bezieht sich auf den Elementgehalt des Metalls und ist als Schichtmittelwert über acht Stunden definiert. [101]

Die TRGS 561 beziffert in Abschnitt 3.3.4 Absatz 2 das zugehörige Risiko: bei einer Exposition von 1 µg/m³ über das gesamte Arbeitsleben ergibt sich ein zusätzliches statistisches Lungenkrebsrisiko in der Größenordnung von etwa 4:1000. Oberhalb dieses Wertes liegt ein hohes Risiko vor, unterhalb ein nicht quantifizierbares, niedrigeres. Die Regel verlangt, die Konzentration einzuhalten und eine weitere weitestgehende Minimierung anzustreben. [19]

Die Pflichten aus § 6 und § 7 der Gefahrstoffverordnung hängen nicht davon ab, ob dieser Wert überschritten wird. Eine Luftmessung beantwortet zudem weder die Frage nach Hautkontakt noch die nach Oberflächenkontamination; für die Gefährdung durch Hautkontakt gilt die deutsche TRGS 401. [179, 99]

Expositionsverzeichnis

Seit der Änderung vom 2. Dezember 2024 steht das Expositionsverzeichnis in einer eigenen Vorschrift. § 10a Absatz 1 Satz 1 verlangt ein Verzeichnis über die Beschäftigten, die Tätigkeiten mit krebserzeugenden, keimzellmutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen der Kategorie 1A oder 1B ausüben, „bei denen die Gefährdungsbeurteilung eine Gefährdung ihrer Gesundheit ergibt", mit Angabe der Tätigkeit sowie der Höhe und der Dauer der Exposition. Nach Absatz 2 ist es bei krebserzeugenden oder keimzellmutagenen Gefahrstoffen 40 Jahre nach Ende der Exposition aufzubewahren; bei Beendigung des Beschäftigungsverhältnisses erhält der Beschäftigte einen Auszug. Nach Absatz 3 kann der Arbeitgeber diese Pflichten erfüllen, indem er die Daten an den zuständigen Unfallversicherungsträger oder dessen Verband übermittelt. [181]

Die Zentrale Expositionsdatenbank der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung ist der dafür eingerichtete Weg. Sie wird dort als kostenloses Angebot beschrieben, mit dem Arbeitgeber ihrer Verpflichtung aus der Gefahrstoffverordnung nachkommen können; bei der Nutzung wird die Aushändigungs- und Archivierungspflicht auf die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung übertragen, und die Daten werden mindestens 40 Jahre nach Ende der Exposition aufbewahrt. [183]

Die Fassung der deutschen TRGS 410 vom 25. September 2026 hat für Chrom(VI) ein eigenes Aufnahmekriterium eingeführt. Nach Abschnitt 4 Absatz 1 Nummer 10 sind Beschäftigte aufzunehmen, wenn „bei Tätigkeiten mit Chrom(VI)-Verbindungen die Konzentration von 1 µg/m³ als Schichtmittelwert überschritten wird". Weitere Kriterien desselben Absatzes greifen unabhängig davon, darunter Nummer 5, wenn Atemschutz als Schutzmaßnahme getragen werden muss, und Nummer 7, wenn keine ausreichende Information über die Höhe einer möglichen Exposition vorliegt. [182]

Abschnitt 4 Absatz 4 derselben Regel erfasst die hier behandelten Tätigkeiten unmittelbar. Aufzunehmen sind Beschäftigte auch dann, wenn Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten, Wartungsarbeiten, Reinigungsarbeiten, Probenahme bei nicht geschlossenen Systemen, Abrissarbeiten oder Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen wiederholt ausgeführt werden und eine Gefährdung auf Grundlage der Gefährdungsbeurteilung nicht ausgeschlossen werden kann. Absatz 3 nennt die dermale Gefährdung als eigenen Aufnahmegrund. Für die Höhe der Exposition bestimmt Abschnitt 5 Absatz 1, dass die Auswirkungen durch das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung unberücksichtigt bleiben. [182]

Die Pflicht trifft auch Fremdfirmen. Abschnitt 3 Absatz 7 stellt fest, dass die Gefährdungsbeurteilung und das Führen des Verzeichnisses auch für sie gelten, dass sie sich vom Auftraggeber die erforderlichen Informationen zu beschaffen haben und dass der Auftraggeber diese Informationen zur Verfügung stellen muss. Für Leiharbeitnehmer dokumentiert nach Absatz 8 der Entleiher während der Überlassung, und der Verleiher übernimmt die Angaben anschließend in sein eigenes Verzeichnis. [182]

Arbeitsmedizinische Vorsorge und Berufskrankheit

Der Anhang Teil 1 Absatz 1 Nummer 1 der deutschen Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge führt „Chrom-VI-Verbindungen" in der Stoffliste. Pflichtvorsorge ist unter anderem dann zu veranlassen, wenn eine wiederholte Exposition nicht ausgeschlossen werden kann und der Gefahrstoff krebserzeugend der Kategorie 1A oder 1B ist. Nach § 4 Absatz 2 darf der Arbeitgeber eine Tätigkeit nur ausüben lassen, wenn der Beschäftigte an der Pflichtvorsorge teilgenommen hat. Unabhängig davon besteht nach Teil 1 Absatz 1 Nummer 2 Buchstabe i Pflichtvorsorge bei Tätigkeiten mit Hochtemperaturwollen, soweit dabei als krebserzeugend eingestufte Faserstäube freigesetzt werden können. [184]

Die Anlage 1 der deutschen Berufskrankheiten-Verordnung führt unter Nummer 1103 „Erkrankungen durch Chrom oder seine Verbindungen". Die Listennummer ist offen formuliert und auf keine bestimmte Verbindung und keine bestimmte Tätigkeit eingeschränkt. [185]

Aufsicht und Sanktionen

Die Überwachung ist staatliche Aufgabe. § 21 Absatz 1 des deutschen Arbeitsschutzgesetzes weist sie den zuständigen Behörden der Länder zu; seit dem Kalenderjahr 2026 sind nach § 21 Absatz 1a jährlich mindestens 5 Prozent der im Land vorhandenen Betriebe zu besichtigen, und von dieser Mindestbesichtigungsquote kann durch Landesrecht nicht abgewichen werden. § 22 Absatz 2 gibt die Befugnis, Arbeitsverfahren zu untersuchen und Messungen vorzunehmen, § 22 Absatz 3 die Anordnungsbefugnis und, bei Nichtausführung, die Untersagung der betroffenen Arbeit. [186]

Die Gefahrstoffverordnung ergänzt diese Befugnisse. Nach § 19 Absatz 3 Nummer 3 kann die zuständige Behörde anordnen, dass der Arbeitgeber die Arbeit einstellen zu lassen hat, wenn er die angeordneten notwendigen Maßnahmen nicht unverzüglich oder nicht innerhalb der gesetzten Frist ergreift. Nach § 19 Absatz 4 ist ihr auf Verlangen ein Nachweis vorzulegen, dass die Gefährdungsbeurteilung fachkundig erstellt wurde. [181]

Daneben überwachen die Unfallversicherungsträger. § 17 Absatz 1 des Siebten Buches Sozialgesetzbuch weist ihnen die Überwachung der Verhütungsmaßnahmen und die Beratung der Unternehmen zu. § 19 Absatz 1 gibt den Aufsichtspersonen die Anordnungsbefugnis im Einzelfall und bei Gefahr im Verzug sofort vollziehbare Anordnungen, § 19 Absatz 2 Nummer 5 die Befugnis, das Vorhandensein und die Konzentration gefährlicher Stoffe zu ermitteln oder auf Kosten des Unternehmers ermitteln zu lassen, und Nummer 6 die Befugnis zur Probenahme. Eine Stilllegungsbefugnis enthält diese Vorschrift nicht; die Stilllegung ist den staatlichen Behörden zugewiesen. [187, 186]

Die Bußgeldtatbestände stehen in § 22 Absatz 1 der Gefahrstoffverordnung. Erfasst sind unter anderem die nicht, nicht richtig oder nicht rechtzeitig dokumentierte Gefährdungsbeurteilung, das nicht oder nicht richtig geführte Gefahrstoffverzeichnis, die Aufnahme einer Tätigkeit entgegen § 7 Absatz 1, die Dauerverwendung belastender persönlicher Schutzausrüstung sowie das nicht, nicht richtig oder nicht vollständig geführte und das nicht für die vorgeschriebene Dauer aufbewahrte Expositionsverzeichnis. [103]

Die Höhe folgt aus dem deutschen Chemikaliengesetz. Für die hier einschlägige Verweisung gilt nach § 26 Absatz 3 ein Rahmen bis fünfzigtausend Euro. Wer durch eine solche Handlung vorsätzlich das Leben oder die Gesundheit eines anderen gefährdet, ist nach § 27 Absatz 2 mit Freiheitsstrafe bis zu fünf Jahren oder mit Geldstrafe bedroht; bei Fahrlässigkeit beträgt der Rahmen nach § 27 Absatz 4 Nummer 2 bis zu zwei Jahren. Nach dem Arbeitsschutzgesetz reicht der Bußgeldrahmen für Verstöße gegen vollziehbare Anordnungen bis dreißigtausend Euro, und § 26 stellt die beharrliche Wiederholung sowie die vorsätzliche Gefährdung von Leben oder Gesundheit eines Beschäftigten unter Strafe. [188, 186]

Abfall

Die deutsche Abfallverzeichnis-Verordnung kennt keinen Abfallschlüssel, der chromatbelastete Dämmstoffe benennt. Die Zuordnung läuft über die Paare aus gefahrenrelevantem und nicht gefahrenrelevantem Eintrag. Für Dämmmaterial außer Asbest kommt 17 06 03* „anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält" in Betracht, mit 17 06 04 als Gegenstück. Für Auskleidungen und feuerfeste Materialien gelten 16 11 03* aus metallurgischen und 16 11 05* aus nichtmetallurgischen Prozessen, mit 16 11 04 und 16 11 06 als Gegenstücken. Für abgetrennte Chromate gilt 16 09 02* „Chromate, z.B. Kaliumchromat, Kalium- oder Natriumdichromat". Das Sternchen bedeutet nach § 3 Absatz 1 gefährlich im Sinne des § 48 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. [189]

Welcher Eintrag des Paares gilt, entscheidet der Gehalt. Die Einleitung der Anlage bestimmt in Nummer 2.2.1, dass ein Abfall als gefährlich eingestuft wird, wenn er relevante gefährliche Stoffe enthält, aufgrund derer er eine oder mehrere der in Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG aufgeführten Eigenschaften aufweist. Für die hier einschlägige Eigenschaft HP 7 karzinogen liegt die Konzentrationsgrenze für einen als Karzinogen der Kategorie 1A oder 1B eingestuften Stoff mit H350 bei 0,1 Prozent. [189, 69]

§ 9a Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes untersagt „die Vermischung, einschließlich der Verdünnung, gefährlicher Abfälle mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien". Absatz 3 verpflichtet Erzeuger und Besitzer, unzulässig vermischte Abfälle unverzüglich zu trennen, soweit das für die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung erforderlich ist. § 326 Absatz 1 Nummer 2 des Strafgesetzbuchs stellt den unbefugten Umgang mit Abfällen, die für den Menschen krebserzeugend sind, unter Strafe. [190, 107]

Der Abstand zum Asbestregime

Für Asbest besteht in Deutschland ein eigenes Verfahren. Die deutsche TRGS 519 verlangt in Abschnitt 2.7 den Nachweis der Sachkunde durch die erfolgreiche Teilnahme an einem behördlich anerkannten Lehrgang mit Prüfung; der Nachweis gilt sechs Jahre. Die Gefahrstoffverordnung verlangt in § 11a Absatz 3 eine behördliche Zulassung für Tätigkeiten im Bereich hohen Risikos, seit dem 20. Dezember 2025 in § 11a Absatz 4a eine Genehmigung für Abbrucharbeiten im Bereich niedrigen und mittleren Risikos, und in § 11a Absatz 4 die Anzeige spätestens eine Woche vor Beginn der Tätigkeiten. Abschnitt 14.5 der TRGS 519 lässt die Aufhebung der Schutzmaßnahmen erst zu, wenn eine visuelle Kontrolle keine sichtbare Restverschmutzung zeigt und eine Messung eine Faserkonzentration unter 500 Fasern je Kubikmeter ergibt. [97, 181]

Für Chrom(VI) an gedämmten Heißteilen besteht keiner dieser Punkte. Es gibt keine Sachkundepflicht, keine Zulassung, keine Genehmigung, keine Anzeige vor Beginn und keine Freimessung. Die einzige behördliche Befassung ist die Mitteilung nach § 10a Absatz 5 der Gefahrstoffverordnung, und diese erfolgt innerhalb von zwei Monaten nach Aufnahme der Tätigkeit und nur dann, wenn der Arbeitsplatzgrenzwert nicht eingehalten wird oder im Bereich hohen Risikos gearbeitet wird. Dieselbe Asymmetrie beschreibt Abschnitt 25 für die übrigen betrachteten Rechtsordnungen. [181]

Was das deutsche Regelwerk benennt

Deutschland ist unter den hier betrachteten Rechtsordnungen die einzige, in der der Anwendungsfall im untergesetzlichen Regelwerk einen eigenen Abschnitt hat. Die TRGS 561 beschreibt in Abschnitt 5.9.3, dass sich an thermisch beanspruchten chromlegierten Industriekomponenten Chrom(VI)-Verbindungen bilden können, dass sich diese in Dämmstoffen oder Montagepasten ablagern können und dass bei Demontage- und Instandhaltungsarbeiten eine Exposition folgen kann. Als Einflussfaktoren nennt sie Stahltemperatur, Chromanteil der Legierung, Reaktionszeit, die Gegenwart von Alkali- und Erdalkalimetalloxiden aus Dämmstoffen oder Montagepasten sowie Sauerstoff und Luftfeuchtigkeit nahe der Oberfläche. Zum Mechanismus hält sie fest, dass er gegenwärtig noch nicht geklärt ist. [19]

Drei Berufsgenossenschaften beschreiben denselben Sachverhalt auf ihren Branchenseiten. Die BG ETEM nennt den Temperaturbereich von etwa 350 bis 800 °C und den Kontakt chromlegierter Stähle mit alkali- und erdalkalimetallhaltigen Dämmstoffen oder Montagepasten. Die BG Verkehr nennt gelbliche Ablagerungen auf Edelstahl bei der Abisolierung von Dämmmaterialien und hält fest, dass die Frage für Schiffsmaschinenräume und Automotoren Gegenstand eigener Untersuchungen ist. Die BG BAU unterscheidet nach dem Vorhandensein alkali- und erdalkalimetallhaltiger Wärmedämmstoffe und führt die Federführung bei der BG ETEM. [2, 191, 192]

Die Gefahrstoffverordnung selbst benennt den Fall nicht. Sie erfasst ihn über den Gefahrstoffbegriff, den Tätigkeitsbegriff und die Feststellungspflicht des § 6 Absatz 1. Die TRGS 910 nennt ihn nicht und verweist nur in der Bemerkungsspalte auf die TRGS 561. Die Abfallverzeichnis-Verordnung kennt keinen eigenen Schlüssel. Die Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge nennt Chrom(VI)-Verbindungen und Hochtemperaturwollen getrennt, ohne sie zu verbinden. [179, 101, 189, 184]

Was daraus für einen Betrieb in Deutschland folgt

Aus den genannten Vorschriften ergibt sich ein prüffähiger Satz von Unterlagen. Dazu gehören die dokumentierte und fachkundig erstellte Gefährdungsbeurteilung für die Materialpaarung aus chromlegiertem Heißteil und basisch belegtem Dämmstoff sowie die durchgeführte und begründete Substitutionsprüfung nach § 7 Absatz 3. Dazu gehören die Information des Veranlassers nach § 5a und die technische Erkundung nach § 6 Absatz 2c. Dazu gehören die Betriebsanweisung und die jährliche Unterweisung nach § 14. Dazu gehören die Eintragung in das Expositionsverzeichnis oder ihre Begründung nach § 10a in Verbindung mit der TRGS 410, die Veranlassung der Pflichtvorsorge und die Einstufung des Abfalls nach dem Gehalt. [179, 180, 181, 182, 184, 189]

Keiner dieser Punkte setzt eine Messung voraus, und keiner entfällt durch ein negatives Messergebnis. Die Pflicht entsteht mit der Möglichkeit der Entstehung, und der Ausschluss dieser Möglichkeit ist der Punkt, der belegt werden müsste.

34. Die Pflichtenlage in der Europäischen Union

Die nationalen Regelwerke der Mitgliedstaaten setzen Unionsrecht um. Dieser Abschnitt stellt zusammen, was das Unionsrecht selbst verlangt, und trennt dabei das Arbeitsschutzrecht vom Stoffrecht und vom Abfallrecht. Die Ausführung obliegt den Mitgliedstaaten; die Pflichten entstehen für einen Betrieb aus dem jeweiligen nationalen Recht.

Anwendungsbereich der Richtlinie 2004/37/EG

Die Richtlinie gilt nach Artikel 3 Absatz 1 „für Tätigkeiten, bei denen Arbeitnehmer aufgrund ihrer Arbeit Karzinogenen, Mutagenen oder reproduktionstoxischen Stoffen ausgesetzt sind oder sein können". Sie knüpft damit an die Exposition bei einer Tätigkeit an. Artikel 2 Buchstabe a Ziffer i definiert das Karzinogen über die Einstufungskriterien des Anhangs I der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 und enthält keine Einschränkung auf gekaufte, in Verkehr gebrachte oder bewusst eingesetzte Stoffe. Calciumchromat und Natriumchromat sind in Anhang VI Teil 3 jener Verordnung harmonisiert als karzinogen der Kategorie 1B eingestuft. [193, 63]

Daneben erfasst Artikel 2 Buchstabe a Ziffer ii Stoffe und Gemische, die „durch ein in diesem Anhang genanntes Verfahren freigesetzt" werden. Anhang I enthält dafür verfahrensbezogene Einträge, darunter Arbeiten mit Exposition gegenüber Quarzfeinstaub und gegenüber Dieselmotoremissionen. Der Unionsgesetzgeber hat den Zweck dieses Anhangs im Erwägungsgrund 17 der Richtlinie (EU) 2017/2398 benannt: für bei einem Arbeitsverfahren entstehenden Quarzfeinstaub besteht keine Einstufung nach der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008, weshalb die Aufnahme in Anhang I angezeigt sei. Für einen prozessentstandenen Stoff, der eine harmonisierte Einstufung trägt, greift damit bereits Ziffer i. [193, 86]

Artikel 3 Absatz 2 verlangt für jede Tätigkeit, bei der eine Exposition auftreten kann, die Ermittlung von Art, Ausmaß und Dauer der Exposition und die wiederholte Bewertung bei jeder Änderung der Bedingungen. Artikel 3 Absatz 3 bestimmt, dass bei der Risikobewertung „alle sonstigen Expositionswege, z. B. Aufnahme in und/oder über die Haut, zu berücksichtigen" sind. [18]

Ersatz, geschlossenes System, Minimierung

Artikel 4 Absatz 1 verlangt vom Arbeitgeber, die Verwendung zu verringern, „insbesondere indem er es bzw. ihn, soweit technisch möglich, durch Stoffe, Gemische oder Verfahren ersetzt, die bei ihrer Verwendung bzw. Anwendung nicht oder weniger gefährlich" sind. Artikel 5 Absatz 2 verlangt für den Fall, dass die Substitution technisch nicht möglich ist, Herstellung und Verwendung in einem geschlossenen System. Artikel 5 Absatz 3 verlangt für den Fall, dass auch das technisch nicht möglich ist, die Verringerung der Exposition „auf das geringste technisch mögliche Niveau". [193]

Artikel 5 Absatz 5 nennt die Einzelmaßnahmen. Buchstabe c verlangt die Gestaltung der Arbeitsverfahren und der technischen Maßnahmen mit dem Ziel, die Freisetzung am Arbeitsplatz zu vermeiden oder möglichst gering zu halten. Buchstabe l verlangt die Gewährleistung einer sicheren Lagerung, Handhabung und Beförderung, unter anderem durch hermetisch verschließbare und klar gekennzeichnete Behälter. Buchstabe m verlangt dasselbe für das Sammeln, die Lagerung und die Beseitigung des Abfalls. Für den Ausbau, die Zwischenlagerung und die Entsorgung einer kontaminierten Dämmung sind damit alle drei Schritte unmittelbar geregelt. [193]

Die allgemeine Rangfolge steht in der Rahmenrichtlinie 89/391/EWG. Artikel 6 Absatz 2 nennt als Grundsätze unter anderem die Vermeidung von Risiken, die Gefahrenbekämpfung an der Quelle, die Berücksichtigung des Stands der Technik und den Vorrang des kollektiven vor dem individuellen Gefahrenschutz. Artikel 9 Absatz 1 Buchstabe a verlangt, über eine Evaluierung der am Arbeitsplatz bestehenden Gefahren zu verfügen; die Ausgestaltung der Dokumentation überlässt Absatz 2 den Mitgliedstaaten. [194]

Der verbindliche Grenzwert

Anhang III Teil A der Richtlinie 2004/37/EG führt den Eintrag „Chrom(VI)-Verbindungen, die Karzinogene im Sinne von Artikel 2 Buchstabe a Ziffer i (als Chrom)" mit einem Grenzwert von 0,005 mg/m³ als zeitlich gewichtetem Mittelwert über acht Stunden. Ein Kurzzeitwert ist nicht festgelegt, und die Spalte Hinweis ist leer. Die Übergangsspalte nennt 0,010 mg/m³ bis zum 17. Januar 2025 und 0,025 mg/m³ bis zum selben Datum für Schweiß- und Plasmaschneidearbeiten sowie ähnliche raucherzeugende Verfahren. [193, 86]

Artikel 5 Absatz 4 bestimmt, dass die Exposition die Grenzwerte des Anhangs III nicht überschreiten darf. Die Pflichten aus den Artikeln 3, 4 und 5 Absätze 1 bis 3 hängen nicht davon ab, ob dieser Wert erreicht wird; sie knüpfen an das Ergebnis der Bewertung an. Deutschland wendet für Chrom(VI) mit 1 µg/m³ einen niedrigeren Wert an, die Niederlande mit 0,001 mg/m³ denselben niedrigeren Wert, beides als Chrom gerechnet. [193, 101]

Verzeichnis, Gesundheitsüberwachung und vierzig Jahre

Das Verzeichnis der exponierten Arbeitnehmer steht in Artikel 12 Buchstabe c. Der Arbeitgeber führt danach eine aktualisierte Liste der Arbeitnehmer, die mit Tätigkeiten beschäftigt sind, für die die Bewertung ein Risiko erkennen lässt, „unter Angabe der Exposition, der sie möglicherweise ausgesetzt waren", soweit diese Information verfügbar ist. Artikel 15 Absatz 1 verlangt für Karzinogene und Mutagene die Aufbewahrung dieser Liste und der Gesundheitsakte für mindestens 40 Jahre nach Ende der Exposition. [193]

Artikel 15 Absatz 2 regelt den Fall der Betriebseinstellung: stellt das Unternehmen seine Tätigkeit ein, sind diese Unterlagen der zuständigen Behörde zur Verfügung zu stellen. Artikel 14 Absatz 8 verlangt, alle Krebserkrankungen, die nach nationalem Recht als Folge einer Exposition bei der Arbeit festgestellt wurden, der zuständigen Behörde zu melden. Artikel 10 Absatz 2 bestimmt, dass die Kosten der Hygiene- und Schutzmaßnahmen nicht zulasten der Arbeitnehmer gehen dürfen. [193]

Stoffrecht: Einstufung, Zulassung, Beschränkung

Die harmonisierte Einstufung steht in Anhang VI Teil 3 der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008. Calciumchromat trägt die Index-Nummer 024-008-00-9 und ist als karzinogen der Kategorie 1B mit H350 eingestuft. Natriumchromat trägt die Index-Nummer 024-018-00-3 und ist als karzinogen, keimzellmutagen und reproduktionstoxisch jeweils der Kategorie 1B eingestuft. Der Sammeleintrag 024-017-00-8 erfasst „Chrom(VI)-Verbindungen, ausgenommen Bariumchromat, und soweit in diesem Anhang nicht gesondert aufgeführt" mit H350i. [63]

Die Zulassungspflicht nach Titel VII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 betrifft die in Anhang XIV aufgenommenen Stoffe. Dort stehen unter anderem Chromtrioxid als Eintrag 16, Natriumdichromat als Eintrag 18, Kaliumchromat als Eintrag 21 und Natriumchromat als Eintrag 22, jeweils mit einem Ablauftermin im Jahr 2017. Calciumchromat ist in Anhang XIV nicht enthalten. Artikel 56 Absatz 1 untersagt Herstellern, Importeuren und nachgeschalteten Anwendern, einen Anhang-XIV-Stoff zur Verwendung in Verkehr zu bringen oder selbst zu verwenden, soweit keine Zulassung oder Ausnahme vorliegt. [195, 66]

Der Verwendungsbegriff ist in Artikel 3 Nummer 24 weit gefasst und umfasst unter anderem Lagern, Bereithalten und Behandeln. Artikel 2 Absatz 2 nimmt Abfall vom Stoffbegriff der Verordnung aus. Ob die Bildung eines Chromats an einem Bauteil und dessen anschließende Weiterverwendung eine Verwendung im Sinne dieser Verordnung ist, wird in den geprüften Rechtstexten und amtlichen Dokumenten nicht behandelt; eine Fundstelle dazu habe ich nicht gefunden. [60, 66]

Die Europäische Chemikalienagentur hat am 29. April 2025 einen Beschränkungsvorschlag für Chrom(VI)-Stoffe veröffentlicht. Er sieht ein Verbot vor, von dem sechs Verwendungskategorien ausgenommen werden sollen, sofern sie festgelegte Grenzen für Arbeitnehmerexposition und Umweltemissionen einhalten; die Kategorien sind die Formulierung von Gemischen, die Galvanisierung auf Kunststoff- und auf Metallsubstraten, die Verwendung von Grundierungen und anderen Schlämmen, sonstige Oberflächenbehandlung und funktionelle Additive oder Prozesshilfsmittel. Die Agentur beschreibt den Vorschlag als möglichen Ersatz der bisherigen Zulassungspflicht und nennt eine sechsmonatige Konsultation ab dem 18. Juni 2025. Den Verfahrensstand im Oktober 2026 konnte ich nicht belegen. [196, 59]

Der Vorschlag ist auf in Verkehr gebrachte und bewusst eingesetzte Chrom(VI)-Stoffe und auf die genannten Verwendungskategorien zugeschnitten. Dämmstoffe, Isolierungen und in situ gebildete Chromate kommen in der Pressemitteilung und im Registereintrag nicht vor. [196]

Abfallrecht der Union

Artikel 7 Absatz 1 der Richtlinie 2008/98/EG bestimmt, dass das Abfallverzeichnis hinsichtlich der Festlegung der als gefährlich einzustufenden Abfälle verbindlich ist. Absatz 2 erlaubt den Mitgliedstaaten, einen Abfall auch dann als gefährlich einzustufen, wenn er nicht als solcher im Verzeichnis ausgewiesen ist, sofern er eine der Eigenschaften des Anhangs III aufweist. Absatz 4 untersagt, eine Neueinstufung als nicht gefährlich „durch Verdünnung oder Mischung des Abfalls" zu erreichen. Artikel 18 Absatz 1 untersagt die Vermischung gefährlicher Abfälle und bestimmt, dass die Vermischung die Verdünnung gefährlicher Stoffe einschließt. [197]

Das Verzeichnis steht im Anhang der Entscheidung 2000/532/EG. Einschlägig sind 17 06 03* für anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält, 16 11 03* und 16 11 05* für gebrauchte Auskleidungen und feuerfeste Materialien aus metallurgischen und aus nichtmetallurgischen Prozessen sowie 16 09 02* für Chromate. Die Bekanntmachung der Kommission 2018/C 124/01 erläutert den Begriff der Spiegeleinträge und führt in ihrem Anhang die Norm EN 15192 für die Bestimmung von sechswertigem Chrom in Feststoffen auf. [198, 199]

Der Abstand zur Asbestrichtlinie

Die Richtlinie 2009/148/EG regelt für Asbest Pflichten, die die Richtlinie 2004/37/EG für Karzinogene allgemein nicht enthält. Artikel 11 verlangt vor Beginn von Abbruch-, Instandhaltungs- oder Renovierungsarbeiten alle erforderlichen Vorkehrungen, um vermutlich asbesthaltige Materialien zu ermitteln, und zwar unter Einholung von Informationen beim Eigentümer und aus einschlägigen Verzeichnissen. Artikel 4 verlangt eine Mitteilung an die zuständige Behörde vor Beginn der Arbeiten, mit Angabe unter anderem der Zahl der beteiligten Arbeitnehmer und ihrer Schulungsnachweise. Artikel 13 verlangt einen Arbeitsplan vor Beginn und nach Abschluss die Überprüfung, dass keine Gefährdung mehr besteht. Artikel 14 mit Anhang Ia legt Mindestanforderungen an Inhalt, Dauer und Häufigkeit der Unterweisung fest, Artikel 15 eine Genehmigung des Unternehmens. [200]

Die Richtlinie 2004/37/EG kennt keine Anzeige vor Beginn. Ihr Artikel 6 verlangt Informationen an die Behörde nur „auf Anforderung". Verzeichnis und Vierzigjahresfrist sind in beiden Richtlinien gleich geregelt. Der Unterschied liegt bei Vorausermittlung, Meldung, Arbeitsplan, Mindestanforderungen an die Schulung und Unternehmensgenehmigung. [193, 200]

Was die Union nicht benennt

In den geprüften Rechtsakten und amtlichen Dokumenten der Union wird die Bildung von Chromaten an gedämmten chromlegierten Heißteilen nicht benannt. Geprüft wurden die konsolidierten Fassungen der Richtlinien 2004/37/EG, 89/391/EWG, 2009/148/EG und 2008/98/EG, der Entscheidung 2000/532/EG sowie der Verordnungen (EG) Nr. 1907/2006 und Nr. 1272/2008, dazu die Bekanntmachung 2018/C 124/01 und die erreichbaren Veröffentlichungen der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz. Keiner der acht verfahrensbezogenen Einträge in Anhang I der Richtlinie 2004/37/EG betrifft Isolierungen oder Heißteile. [193, 197, 199]

Das thematisch nächstliegende Dokument der Kommission behandelt prozessbedingt entstehendes Chrom(VI) ausschließlich beim Schweißen, beim thermischen Schneiden und bei ähnlichen raucherzeugenden Verfahren. Wärmedämmstoffe, Calciumoxid und die Bildung an heißen Edelstahloberflächen außerhalb dieser Verfahren kommen dort nicht vor. Das ist ein Befund über den geprüften Bestand und keine Aussage über die Pflichtenlage; diese folgt aus dem Wortlaut der Artikel 2, 3, 4 und 5. [201, 193]

Was daraus folgt

Für einen Betrieb in einem Mitgliedstaat entsteht die Pflicht aus dem nationalen Umsetzungsrecht. Der Prüfungsmaßstab des Unionsrechts ist dabei an drei Stellen schärfer als die Frage nach einer Messung. Die Bewertung nach Artikel 3 Absatz 2 ist tätigkeitsbezogen und bei jeder Änderung der Bedingungen zu wiederholen. Die Hautaufnahme ist nach Artikel 3 Absatz 3 ausdrücklich einzubeziehen. Die Verringerung nach Artikel 5 Absatz 3 ist an keine Schwelle geknüpft; sie greift, sobald ein geschlossenes System technisch nicht möglich ist. Ein Mitgliedstaat kann strengere Vorschriften vorsehen; die Richtlinie setzt Mindestanforderungen. [193]

35. Die Pflichtenlage in den Niederlanden

Die Niederlande sind Mitgliedstaat der Europäischen Union und haben die Richtlinie 2004/37/EG im Arbeidsomstandighedenbesluit umgesetzt. Der hier behandelte Anwendungsfall ist auch dort nicht als solcher benannt. Dieser Abschnitt stellt die geltenden niederländischen Vorschriften zusammen und gibt zu jeder Aussage die Fundstelle an.

Der Stoffbegriff ist herkunftsneutral

Artikel 1.1 Absatz 5 Buchstabe b des Arbeidsomstandighedenbesluit definiert gefährliche Stoffe als „stoffen of mengsels waaraan werknemers bij de arbeid worden of kunnen worden blootgesteld die vanwege de eigenschappen van of de omstandigheden waaronder die stoffen of mengsels voorkomen gevaar voor de veiligheid of gezondheid kunnen opleveren". Die Definition knüpft an die Exposition bei der Arbeit und an die Umstände des Vorkommens an. Einkauf, Inverkehrbringen und beabsichtigte Verwendung kommen darin nicht vor. [203]

Artikel 4.2 Absatz 1 verlangt die Beurteilung von Art, Umfang und Dauer der Exposition, und zwar ausdrücklich „ongeacht of met deze stoffen daadwerkelijk arbeid wordt of zal worden verricht", also unabhängig davon, ob mit diesen Stoffen tatsächlich gearbeitet wird. Diese Beurteilung ist Teil der schriftlichen Risiko-Inventarisierung und -Bewertung nach Artikel 5 Absatz 1 des Arbeidsomstandighedenwet. Nach Artikel 4.2 Absatz 8 ist sie jedenfalls dann zu überprüfen, wenn mit neuen Arbeiten begonnen wird, bei denen gefährliche Stoffe beteiligt sind. [121, 202]

Artikel 4.1c Absatz 1 Buchstabe c verlangt, die Exposition zu verhindern oder zu minimieren durch „gebruik te maken van adequate voorzieningen bij het uitvoeren van reparatie- of onderhoudswerkzaamheden". Buchstabe j verlangt geeignete Arbeitsmethoden einschließlich Regelungen für die sichere Behandlung, Lagerung und den Transport gefährlicher Stoffe und von Abfällen, die solche Stoffe enthalten. Absatz 2 bindet diese Maßnahmen an den Stand von Wissenschaft und Technik. Buchstabe c ist in Abschnitt 1 des vierten Kapitels die einzige Stelle, an der Reparatur- und Instandhaltungsarbeiten genannt werden. [203]

Die zusätzlichen Pflichten für krebserzeugende Stoffe

Abschnitt 2 des vierten Kapitels gilt nach Artikel 4.12 zusätzlich, sobald Arbeitnehmer krebserzeugenden, mutagenen oder reproduktionstoxischen Stoffen ausgesetzt sind oder sein können „of aan stoffen die vrijkomen bij kankerverwekkende of mutagene processen". Die Begriffsbestimmung in Artikel 4.11 Buchstabe b knüpft in Ziffer 1 an die Einstufungskriterien der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 an. Chrom(VI)-Verbindungen sind damit erfasst. [203, 63]

Artikel 4.13 verlangt, über die Beurteilung nach Artikel 4.2 hinaus sieben Angaben schriftlich in die Risiko-Inventarisierung aufzunehmen. Die erste ist „de reden waarom het gebruik van een kankerverwekkende, mutagene of reprotoxische stof of het toepassen van een kankerverwekkend of mutageen proces voor het verrichten van de arbeid strikt noodzakelijk is en vervanging technisch niet uitvoerbaar is". Es folgen Jahresmenge oder Anwendungshäufigkeit, Art der Arbeit, Zahl der exponierten Arbeitnehmer, präventive Maßnahmen, verwendete Schutzausrüstung und die Fälle, in denen ersetzt wurde. Die Begründung der Unmöglichkeit einer Substitution ist damit Bestandteil der Dokumentation. [203]

Artikel 4.17 verlangt technische und organisatorische Maßnahmen, die die Exposition so weit wie möglich an der Quelle verhindern, insbesondere durch Ersatz, soweit dies technisch durchführbar ist. Artikel 4.18 Absatz 1 verlangt für den Fall, dass dies nicht durchführbar ist, Herstellung und Verwendung in einem geschlossenen System; Absatz 2 nennt kollektive Maßnahmen und örtliche Absaugung, Absatz 3 persönliche Schutzausrüstung erst danach und Absatz 4 die Begrenzung der Tragedauer auf das strikt Notwendige. [109, 203]

Artikel 4.19 regelt die begleitenden Pflichten. Buchstabe a verlangt eine Unterrichtung oder Anweisung, die mindestens einmal jährlich stattfindet. Buchstabe c verlangt die Kennzeichnung von Gefahrenzonen; der Begriff ist in Artikel 4.11 Buchstabe h als Ort definiert, an dem Arbeitnehmer solchen Stoffen ausgesetzt werden oder ausgesetzt werden können. Buchstabe e verlangt wirksame Mittel für das sichere Sammeln, Lagern und Beseitigen von Abfällen, so weit wie möglich in hermetisch geschlossenen und deutlich gekennzeichneten Behältern. Artikel 4.20 verlangt Zonen zum Essen und Trinken ohne Expositionsgefahr, wirksame Arbeitskleidung, deren getrennte Aufbewahrung sowie Wasch- und Duschräume. [203]

Der Grenzwert 0,001 mg/m³

Der gesetzliche Grenzwert steht in Bijlage XIII Teil B2 der Arbeidsomstandighedenregeling, der Liste der nach dem Risikoansatz festgelegten Grenzwerte für krebserzeugende Stoffe. Der Eintrag lautet „Chroom (VI)-verbindingen (als Cr)“ mit 0,001 mg/m³ als zeitlich gewichtetem Mittelwert über acht Stunden. Eine CAS-Nummer, ein Fünfzehn-Minuten-Wert und eine Hautnotation sind nicht eingetragen. Nach der Erläuterung zu Bijlage XIII bezieht sich der Wert bei Stoffen, die als Partikel vorkommen können, auf die als einatembarer Staub beprobte Fraktion. [204]

Der Wert gilt seit dem 1. März 2017. Er wurde durch eine Verordnung des Ministers für Soziales und Arbeit vom 18. Oktober 2016 eingeführt, die zugleich die bis dahin getrennten Einträge für Bariumchromat, Calciumchromat, lösliche und schwerlösliche Chrom(VI)-Verbindungen, Chromtrioxid, Bleichromat, Strontiumchromat und Zinkchromat gestrichen hat. Die amtliche Begründung nennt für Chrom(VI)-Verbindungen die Schätzung des niederländischen Gesundheitsrats von 4 zu 100.000 bei 40 Jahren Exposition gegenüber 0,01 µg/m³ und von 4 zu 1.000 bei 1 µg/m³. Sie bezeichnet 1 zu 10.000 je Jahr als Verbotsrisiko und hält fest, dass der Wert auf diesem maximal zu akzeptierenden Risiko festgelegt wird. [205]

Dieselbe Begründung stellt fest, dass die Einführung des niedrigeren Grenzwerts unberührt lässt, dass einzelne Betriebe den Stoff ersetzen oder eine niedrigere Exposition erreichen müssen, wenn das technisch durchführbar ist, und verweist dafür auf die Artikel 4.17 und 4.18 des Arbeidsomstandighedenbesluit. Der Grenzwert ist damit auch nach der amtlichen Begründung kein Maßstab, dessen Einhaltung die Substitutionsprüfung erübrigt. [205]

Für den hier behandelten Fall ist Artikel 4.16 Absatz 2 der zentrale Satz. Besteht für einen krebserzeugenden Stoff oder für einen bei einem krebserzeugenden Verfahren freigesetzten Stoff kein gesetzlicher Grenzwert, so legt der Arbeitgeber selbst „een zo laag mogelijke grenswaarde“ fest. Bei Überschreitung eines Grenzwerts verlangt Absatz 3 unverzüglich wirksame Maßnahmen zur Rückführung unter diesen Wert, und Absatz 5 verlangt, im Maßnahmenplan auszuweisen, wie die Überschreitung so schnell wie möglich beseitigt wird. [203]

Liste der Arbeitnehmer und vierzig Jahre

Artikel 4.15 Absatz 1 verlangt eine Liste der Arbeitnehmer, die solchen Stoffen ausgesetzt werden oder ausgesetzt werden können, „onder vermelding van de blootstelling die zij hebben ondergaan“. Absatz 2 gibt jedem Arbeitnehmer das Recht auf Einsicht und Abschrift der ihn betreffenden Daten. Artikel 4.10c Absatz 4 verlangt die Aufbewahrung dieser Liste und der Ergebnisse der arbeitsmedizinischen Untersuchung für mindestens 40 Jahre nach Beendigung der Exposition. [203]

Artikel 4.10c Absatz 5 regelt den Fall der Betriebseinstellung. Werden die Tätigkeiten innerhalb dieser vierzig Jahre eingestellt, so werden die Unterlagen „overgedragen aan de toezichthouder“, also der Aufsichtsbehörde übergeben. Die niederländische Regelung benennt damit die Stelle, an die die Unterlagen gehen; die deutsche Gefahrstoffverordnung regelt diesen Fall nicht ausdrücklich und kennt stattdessen die Übertragung der Pflichten durch Datenübermittlung an den Unfallversicherungsträger. [203, 181]

Aufsicht, Bußgeld und Wirtschaftsdelikt

Die Nederlandse Arbeidsinspectie kann nach Artikel 27 des Arbeidsomstandighedenwet eine eis tot naleving stellen, also verbindlich bestimmen, auf welche Weise eine Vorschrift einzuhalten ist, verbunden mit einer Frist. Artikel 9.22 des Arbeidsomstandighedenbesluit lässt dieses Mittel für die hier einschlägigen Artikel des vierten Kapitels zu. Nach Artikel 28 kann ein Aufsichtsbeamter anordnen, dass bestimmte Arbeiten eingestellt werden oder nicht begonnen werden dürfen, wenn sie nach seinem vernünftigen Urteil eine ernste Gefahr für Personen darstellen; die Befugnis schließt die Versiegelung von Arbeitsmitteln und Arbeitsplätzen ein. [202, 203]

Die Verstöße gegen die genannten Artikel des vierten Kapitels sind nach Artikel 9.9b Absatz 1 Buchstabe d des Arbeidsomstandighedenbesluit bußgeldbewehrt. Der Höchstbetrag liegt nach Artikel 34 Absatz 3 des Arbeidsomstandighedenwet bei der fünften Kategorie des Artikels 23 Absatz 4 des Wetboek van Strafrecht, seit dem 1. Januar 2026 bei 110.000 Euro. Bei Wiederholung derselben Pflichtverletzung innerhalb von fünf Jahren erhöht sich der Betrag nach Artikel 34 Absatz 5 um 100 Prozent. [108, 111, 203]

Die Beleidsregel boeteoplegging arbeidsomstandighedenwetgeving beziffert die Ausgangsbeträge. Die vollständige Nichtdurchführung der Expositionsbeurteilung nach Artikel 4.2 Absatz 1 ist dort als overtreding met directe boete eingestuft, also ohne vorherige Verwarnung bußgeldbewehrt, mit dem fünften Normbetrag von 4.500 Euro. Die Überschreitung des Grenzwerts nach Artikel 4.16 Absatz 3 ist als zware overtreding eingestuft, mit dem sechsten Normbetrag von 9.000 Euro und dem Faktor zwei. Für die Artikel 4.1b, 4.1c, 4.17 und 4.18 gilt ebenfalls der sechste Normbetrag. Die Beträge gelten für Betriebe ab 500 Beschäftigten und werden darunter gestaffelt abgesenkt. [207]

Oberhalb des Bußgeldrechts steht Artikel 32 des Arbeidsomstandighedenwet. Danach ist es dem Arbeitgeber verboten, entgegen dem Gesetz oder den darauf beruhenden Bestimmungen zu handeln oder zu unterlassen, wenn dadurch, wie er weiß oder vernünftigerweise wissen muss, Lebensgefahr oder ein ernster Gesundheitsschaden für einen oder mehrere Arbeitnehmer entsteht oder zu erwarten ist. Ein Verstoß dagegen ist nach Artikel 1 des Wet op de economische delicten ein Wirtschaftsdelikt und bei Vorsatz ein Verbrechen mit einem Rahmen bis zu sechs Jahren Freiheitsstrafe. Für juristische Personen kann die Geldbuße nach Artikel 23 Absatz 7 des Wetboek van Strafrecht bis zur nächsthöheren Kategorie reichen. [108, 110, 111]

Keine der Pflichten des vierten Kapitels für Gefahrstoffe und für krebserzeugende Stoffe ist als ernstige overtreding eingestuft. Die abschließende Aufzählung in Artikel 9.10a Absatz 3 des Arbeidsomstandighedenbesluit nennt aus diesem Kapitel die Vorschriften zu Asbest, zu Propansulton, zu Stoffverboten und zu Bleiweiß. Die Verwarnung mit anschließendem Stilllegungsbefehl greift deshalb für die hier behandelten Pflichten erst nach wiederholter Feststellung. [203]

Abfall

Die Regeling Europese afvalstoffenlijst erklärt die Liste im Anhang der Entscheidung 2000/532/EG für maßgeblich. Für Dämmmaterial außer Asbest kommt 17 06 03* „overig isolatiemateriaal dat uit gevaarlijke stoffen bestaat of dergelijke stoffen bevat" in Betracht, für Ofenschutt 16 11 03* und 16 11 05*, für Chromate als Stoff 16 09 02*. Artikel 4 Absatz 1 ordnet den Abfall dem mit Sternchen gekennzeichneten Eintrag zu, wenn festgestellt wird, dass er eine der Eigenschaften des Anhangs III der Abfallrahmenrichtlinie besitzt. Absatz 2 bestimmt, dass dabei die Folgen des Verdampfens, Verdünnens, Vermischens oder Auslaugens nicht berücksichtigt werden. [209, 198]

Die Beweislast liegt beim Abfallerzeuger. Die amtliche Erläuterung des Informatiepunt Leefomgeving formuliert das so: „De Eural kent een omgekeerde bewijslast: zolang u niet kunt aantonen dat het geen gevaarlijk afval is, is het gevaarlijk afval." Artikel 10.39 Absatz 1 Buchstabe a des Wet milieubeheer verlangt vom Abgebenden eine Beschreibung von Art, Eigenschaften und Zusammensetzung des Abfalls; Artikel 10.40 Absatz 2 verbietet dem Empfänger die Annahme ohne diese Beschreibung und ohne Begleitschein. Artikel 10.54 Absatz 1 verbietet während Sammlung und Transport das Mischen einschließlich des Verdünnens. [209, 210]

Der Abstand zum Asbestregime

Abschnitt 5 des vierten Kapitels regelt Asbest gesondert. Artikel 4.54a Absatz 1 verlangt, die Anwesenheit von Asbest vollständig zu inventarisieren, bevor mit dem Abbrechen oder Auseinandernehmen von Bauwerken oder Objekten begonnen wird, in denen nach vernünftiger Erwartung Asbest verwendet wurde; die Inventarisierung und der Bericht sind nach Absatz 4 einem zertifizierten Unternehmen vorbehalten. Artikel 4.54d Absatz 1 verlangt für die Entfernung ab Risikoklasse 2 ein Unternehmen mit Zertifikat, Absatz 5 und 7 die Fachkundezertifikate der eingesetzten Personen. Artikel 4.47c Absatz 1 verlangt die Meldung an die Aufsicht spätestens zwei Tage vor Beginn der Arbeiten. Artikel 4.51a verlangt vor Aufhebung der Gefahrenzone eine Endbeurteilung mit visueller Inspektion und Messung gegen den Wert von 10.000 Fasern je Kubikmeter. [121, 208]

Für Chrom(VI) besteht keiner dieser Punkte. Es gibt keine Vorab-Inventarisierung, keine Zertifizierungspflicht, keine Meldung vor Beginn, keine Endbeurteilung und kein Risikoklassensystem. Die Liste nach Artikel 4.15 und die Vierzigjahresfrist nach Artikel 4.10c entsprechen dem Register, das Abschnitt 5 für Asbest vorsieht. [203, 208]

Der niederländische Chroom-6-Komplex

In den Niederlanden hat Chrom(VI) seit 2014 eine eigene öffentliche Geschichte. Das Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu hat im Auftrag der Paritaire Commissie Chroom-6 die Standorte des Verteidigungsministeriums untersucht und 2018 und 2021 berichtet, in weiteren Untersuchungen die Werkstätten von NS und NedTrain sowie das Wiedereingliederungsprojekt tROM in Tilburg. Für die Betroffenen beim Verteidigungsministerium besteht seit 2018 eine staatliche Entschädigungsregelung. [211, 212, 213, 215]

Gegenstand dieser Untersuchungen sind chromathaltige Farben und Grundierungen und deren Bearbeitung. Die Fragestellung der Paritaire Commissie ist im Bericht von 2021 auf „chroom-6-houdende verf of verfstof" bezogen. Der Bericht zu NS und NedTrain beginnt mit dem Satz, dass in alten Farbschichten mancher Züge Chrom(VI) enthalten ist. Der Bericht zu Tilburg beschreibt das Entfernen alter Farbschichten an Museumszügen. Die Entschädigungsregelung listet in Anlage 2 die bewertungsrelevanten Tätigkeiten auf; die einzige nicht farbbezogene Position ist „lassen of snijbranden van roestvast staal". [211, 212, 213, 215]

Eine Volltextsuche in den fünf Hauptberichten nach den niederländischen Begriffen für Isolierung, Dämmmaterial, Mineralwolle, Steinwolle, Glaswolle und Hitzeschutz ergibt keine Treffer. Der umfangreichste öffentliche Chrom(VI)-Komplex Europas hat den hier behandelten Entstehungsweg nicht erfasst. [211, 212, 213]

Was in den Niederlanden nicht veröffentlicht ist

Calciumchromat und Natriumchromat stehen namentlich auf der SZW-lijst der krebserzeugenden Stoffe, zuletzt veröffentlicht am 9. Juli 2026. Die Liste bezeichnet sich selbst als nicht abschließend und gibt an, welche Stoffe und Verfahren jedenfalls in Artikel 4.11 des Arbeidsomstandighedenbesluit gemeint sind. Die zugehörige Liste der krebserzeugenden Verfahren enthält zehn Positionen, von der Auraminherstellung bis zu Emissionen beim Eisen- und Stahlguss; ein Verfahren mit Chromatbildung steht nicht darunter. Auch die national bestimmten Verfahren nach Artikel 4.20c der Arbeidsomstandighedenregeling umfassen nur Dieselmotoremissionen und zwei Stoffgemische. [206, 204]

Der Bericht, den das Ministerium für Soziales und Arbeit eigens zur Übersicht über die Chrom(VI)-Anwendungen am Arbeitsplatz beauftragt hat, führt die Exposition an feuerfesten Auskleidungen von Öfen und Kesseln auf im Material vorhandenes Chrom(VI) zurück, auf Rohstoffe und Zuschläge. Die thermochemische Bildung an chromlegiertem Stahl durch basische Oxide aus dem Dämmstoff kommt dort nicht vor, auch nicht als Hypothese. Der Bericht schließt seine Gesamtschau mit dem Hinweis, dass zu den Feldern Instandhaltung alter Anlagen, Abbruch und Abfallverarbeitung keramischer Produkte sowie bestimmte Arbeiten der Grundmetallindustrie „geen informatie over verkregen" wurde. [214]

Die Veröffentlichungen des Ministeriums und der Nederlandse Arbeidsinspectie nennen als Expositionsquellen das Entfernen alter Farbschichten, die Chromatherstellung, das Verchromen, bestimmte Zementsorten, das Schleifen und Schweißen chromhaltiger Oberflächen und imprägniertes Holz. Das Beheersregime chroom-6 trägt den Untertitel „Toe te passen arbeidshygiëne bij het werken aan verven en coatings" und beschränkt sich nach seiner eigenen Fußnote auf Farbstaub von bearbeiteten gestrichenen Oberflächen. Die Themenseite der Arbeidsinspectie nennt Arbeiten an chromhaltigen Metallen und Beschichtungen und hält zugleich fest: „Een negatieve uitslag is echter niet genoeg om te besluiten om géén maatregelen te nemen." [216, 217]

Die Beleidsregel arbocatalogi 2019 führt die von der Arbeidsinspectie geprüften Branchenkataloge auf. Die Zeile „Installatie- en isolatie" nennt als beanspruchte Vorschriften unter anderem die Artikel 4.11 bis 4.20 des Arbeidsomstandighedenbesluit, also die Vorschriften für krebserzeugende Stoffe. Als Gefahrstoffe nennt dieselbe Zeile Asbest und Quarzstaub. Chrom(VI) steht dort nicht. [218]

Dies ist eine Aussage über den geprüften Bestand. Sie entkräftet die Pflichtenlage nicht. Die herkunftsneutrale Definition in Artikel 1.1 Absatz 5, die Formulierung „ongeacht of met deze stoffen daadwerkelijk arbeid wordt of zal worden verricht" in Artikel 4.2 Absatz 1 und die durchgehende Formel „stoffen die vrijkomen bij kankerverwekkende of mutagene processen" in Abschnitt 2 erfassen auch unbeabsichtigt entstandene Chromate. Was fehlt, ist die Benennung des Entstehungswegs. [203, 121]

Was daraus für einen Betrieb in den Niederlanden folgt

Aus den genannten Vorschriften ergibt sich ein prüffähiger Satz von Unterlagen. Dazu gehören die schriftliche Beurteilung nach Artikel 4.2 Absatz 1 für die Materialpaarung aus chromlegiertem Heißteil und basisch belegtem Dämmstoff sowie die sieben Angaben nach Artikel 4.13 einschließlich der Begründung, warum eine Substitution technisch nicht durchführbar ist. Dazu gehört der vom Arbeitgeber festgelegte Grenzwert nach Artikel 4.16 Absatz 2, soweit kein gesetzlicher Wert einschlägig ist. Dazu gehören die Liste nach Artikel 4.15 mit vierzigjähriger Aufbewahrung, die jährliche Unterweisung nach Artikel 4.19 Buchstabe a und die Beschreibung des Abfalls nach Artikel 10.39 des Wet milieubeheer. [121, 203, 210]

Die vollständige Nichtdurchführung der Beurteilung ist dabei der einzige dieser Punkte, der ohne vorherige Verwarnung bußgeldbewehrt ist. Alle übrigen setzen eine Feststellung und eine Frist voraus. Der Abstand zum Asbestregime liegt beim Verfahren, das die Pflichten auslöst. Die Pflichten selbst stehen im Wortlaut und gelten ohne vorherige Benennung des Falles. [207, 208]

36. Die Pflichtenlage im Vereinigten Königreich

Dieser Abschnitt stellt das britische Regelwerk an einer Stelle zusammen, wie es die drei vorangehenden Abschnitte für Deutschland, die Europäische Union und die Niederlande tun. Das Vereinigte Königreich ist seit dem 1. Januar 2021 nicht mehr an die Richtlinie 2004/37/EG gebunden. Die tragende Vorschrift, die Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002, ist älter als diese Richtlinie und gilt unverändert weiter. [122, 113]

Der räumliche Geltungsbereich ist geteilt. Die COSHH Regulations 2002 und die Control of Asbestos Regulations 2012 tragen den Vermerk „E+W+S" und gelten damit in England, Wales und Schottland; Nordirland hat mit den Control of Substances Hazardous to Health Regulations (Northern Ireland) 2003 und den Control of Asbestos Regulations (Northern Ireland) 2012 eigene, inhaltsgleich aufgebaute Vorschriften. Im Abfallrecht gehen die vier Landesteile eigene Wege, mit je eigenen Verordnungen für England, Wales, Schottland und Nordirland. Die Angaben dieses Abschnitts beziehen sich, wo nichts anderes steht, auf England und Wales. [238]

Der Stoffbegriff hängt nicht an der Einstufung

Regulation 2(1) bestimmt, was ein „substance hazardous to health" ist. Buchstabe a erfasst jeden Stoff, der die Kriterien für die Einstufung in eine Gesundheitsgefahrenklasse nach der CLP-Verordnung erfüllt, und zwar ausdrücklich „whether or not the substance is classified under that Regulation". Buchstabe b erfasst Stoffe mit einem von der britischen Behörde HSE genehmigten Arbeitsplatzgrenzwert, Buchstabe d Staub jeder Art oberhalb der dort genannten Konzentration. Ein Chromat, das an der Grenzfläche zwischen Dämmung und Heißteil entsteht, erfüllt die Kriterien der Buchstaben a und b, ohne dass es einen Lieferanten, ein Sicherheitsdatenblatt oder eine formale Einstufung geben muss. [220]

Die Begriffsbestimmung des Karzinogens in derselben Vorschrift wiederholt den Gedanken. Erfasst ist ein Stoff, der die Kriterien für die Einstufung als Karzinogen der Kategorie 1A oder 1B nach Anhang I der CLP-Verordnung erfüllt, „whether or not the substance or mixture would be required to be classified under the Regulation", oder ein Stoff oder Verfahren, der in Schedule 1 aufgeführt ist. Schedule 1 enthält keinen Eintrag zu Chrom. Die Karzinogeneigenschaft eines in situ gebildeten Chromats folgt deshalb aus dem ersten Weg, über die Einstufungskriterien, und nicht aus einer Liste. [220]

Das ist die britische Entsprechung zu dem, was die deutsche Gefahrstoffverordnung in § 2 Absatz 1 Nummer 3 und 4 regelt. Beide Rechtsordnungen knüpfen die Pflichten an die Eigenschaft des Stoffes und nicht an seinen Weg in den Betrieb. [179]

Beurteilung, Instandhaltung und die Schwelle von fünf Beschäftigten

Regulation 6(1) enthält ein Beginnverbot. Ein Arbeitgeber darf Arbeiten, die Beschäftigte einem gesundheitsgefährlichen Stoff aussetzen können, nicht ausführen, solange er keine „suitable and sufficient assessment" der dadurch entstehenden Gefährdung und der erforderlichen Schritte durchgeführt und diese Schritte umgesetzt hat. Abschnitt 25 behandelt diese Vorschrift im Vergleich mit den übrigen Rechtsräumen. [122]

Regulation 6(2) zählt auf, was die Beurteilung zu berücksichtigen hat. Buchstabe e nennt den hier einschlägigen Fall ausdrücklich: „activities, such as maintenance, where there is the potential for a high level of exposure". Buchstabe b nennt die Angaben des Lieferanten einschließlich des Sicherheitsdatenblatts, Buchstabe c Höhe, Art und Dauer der Exposition, Buchstabe f einen einschlägigen Arbeitsplatzgrenzwert und Buchstabe i die Ergebnisse von Messungen nach Regulation 10. Die Wartung ist damit in der britischen Vorschrift als eigener Beurteilungsgegenstand benannt, so wie § 6 Absatz 5 der deutschen Gefahrstoffverordnung Instandhaltungsarbeiten benennt. [122, 179]

Regulation 6(4) begrenzt die Dokumentationspflicht. Nur ein Arbeitgeber mit fünf oder mehr Beschäftigten hat die wesentlichen Ergebnisse der Beurteilung und die nach Regulation 7 getroffenen Schritte aufzuzeichnen. Für kleinere Betriebe besteht die Beurteilungspflicht, nicht aber die Aufzeichnungspflicht. Der Unterschied fällt in dem hier behandelten Feld ins Gewicht, weil Dämm- und Instandhaltungsarbeiten vielfach von kleinen Unternehmen ausgeführt werden. [220]

Eine Erkundungspflicht vor Arbeitsbeginn fehlt. Regulation 6 setzt ein, wenn die Arbeit geeignet ist, Beschäftigte auszusetzen, und sagt nichts darüber, wie der Arbeitgeber das Vorhandensein des Stoffes feststellt. Eine Vermutungsregel für den Zweifelsfall gibt es im COSHH-Regime ebenfalls nicht. Beides steht im Asbestregime, in Regulation 5 der Control of Asbestos Regulations 2012. [122, 123]

Verhinderung, Ersatz und das vernünftigerweise Praktikable

Regulation 7(1) verlangt, die Exposition zu verhindern oder, soweit das nicht vernünftigerweise praktikabel ist, angemessen zu beherrschen. Regulation 7(2) stellt den Vorrang des Ersatzes klar; Regulation 7(3) ordnet die weiteren Stufen von der Gestaltung der Verfahren über die Beherrschung an der Quelle bis zur persönlichen Schutzausrüstung. Regulation 7(4) Buchstabe b verlangt ausdrücklich „the adoption of suitable maintenance procedures", Buchstabe c die Verringerung der Zahl der exponierten Beschäftigten, der Höhe und Dauer der Exposition und der am Arbeitsplatz vorhandenen Menge auf das für die Arbeit erforderliche Mindestmaß. Abschnitt 30 gibt den Wortlaut der Absätze 1, 2 und 5 wieder. [113]

Für Karzinogene tritt Regulation 7(5) hinzu, mit der vollständigen Einhausung von Prozess und Handhabungssystemen, soweit vernünftigerweise praktikabel, dem Verbot von Essen, Trinken und Rauchen in möglicherweise kontaminierten Bereichen, der regelmäßigen und anlassbezogenen Reinigung von Böden, Wänden und sonstigen Oberflächen, der Kennzeichnung der betroffenen Bereiche und Anlagen und der Lagerung, Handhabung und Entsorgung in geschlossenen und eindeutig gekennzeichneten Behältern. Diese Maßnahmen gelten unabhängig von jeder Messung. [113]

Den Maßstab für die Beherrschung setzt Regulation 7(7). Die Beherrschung gilt nur dann als angemessen, wenn die Grundsätze guter Praxis nach Schedule 2A angewendet werden, ein genehmigter Arbeitsplatzgrenzwert nicht überschritten wird und bei einem Stoff mit dem Gefahrenhinweis H340, H350 oder H350i oder einem in Schedule 1 aufgeführten Stoff oder Verfahren die Exposition „reduced to as low a level as is reasonably practicable" ist. Die Chromate der hier behandelten Art tragen H350 oder H350i. Die Minimierungspflicht gilt für sie also zusätzlich zum Grenzwert und unabhängig davon, ob er eingehalten wird. [220]

Die drei Bedingungen sind mit „and" verknüpft. Die Einhaltung des Grenzwertes allein erfüllt die Beherrschungspflicht deshalb nicht. Die Minimierung nach Buchstabe c hängt ihrerseits nicht am Grenzwert, weil sie allein an den Gefahrenhinweis oder an Schedule 1 anknüpft; sie gilt damit auch dort, wo kein Grenzwert festgelegt ist, und ebenso dort, wo einer festgelegt und eingehalten ist. Der einleitende Halbsatz lautet „where there is exposure to a substance hazardous to health" und kennt keine Schwelle. [220]

Der Maßstab ist anders formuliert als der unionsrechtliche. Artikel 5 Absatz 3 der Richtlinie 2004/37/EG verlangt, die Exposition „auf das geringste technisch mögliche Niveau" zu verringern, und Artikel 5 Absatz 4 bestimmt daneben, dass die Grenzwerte des Anhangs III nicht überschritten werden dürfen. Die britische Vorschrift stellt auf das vernünftigerweise Praktikable ab, die deutsche in § 10 Absatz 1 der Gefahrstoffverordnung auf den Stand der Technik. [193, 179]

Schedule 2A nennt unter Buchstabe b die Berücksichtigung aller einschlägigen Aufnahmewege, und zwar Inhalation, Hautaufnahme und Verschlucken. Eine Luftmessung allein erfüllt diese Vorgabe nicht. Buchstabe a verlangt, Verfahren und Tätigkeiten so zu gestalten, dass Freisetzung und Verbreitung des Stoffes möglichst gering bleiben. [220, 41]

Der Maßstab „so far as is reasonably practicable" wirkt im Verfahren anders als es aussieht. Section 40 des Health and Safety at Work etc. Act 1974 legt die Beweislast dem Angeklagten auf: in einem Strafverfahren wegen Verletzung einer solchen Pflicht hat er zu beweisen, dass mehr als das Getane nicht praktikabel oder nicht vernünftigerweise praktikabel war. Wer sich darauf beruft, die Substitution sei nicht praktikabel gewesen, hat das zu belegen. [219]

Der Grenzwert 0,01 mg/m³ und der Stand der HSE-Veröffentlichungen

EH40/2005 in der vierten Ausgabe 2020 führt in Tabelle 1 den Eintrag „Chromium (VI) compounds (as Cr)" mit einem Achtstundenmittelwert von 0,01 mg/m³ und einem Wert von 0,025 mg/m³ für prozessbedingt erzeugte Exposition, mit den Anmerkungen Carc, sen und BMGV. Die Fußnote zu diesem Eintrag bestimmt: „‚Process generated' refers to exposures to Chromium (VI) Compounds generated as a result of a work process, such as fumes from welding." Der abgesenkte Wert gilt seit dem 17. Januar 2020; die Vorbemerkung der Ausgabe führt Chrom(VI)-Verbindungen unter den Stoffen mit abgesenktem Grenzwert auf. [222]

Tabelle 2 derselben Ausgabe führt einen biologischen Richtwert von 10 µmol Chrom je mol Kreatinin im Urin, zu bestimmen nach der Schicht. Der Wert erfasst Chrom und nicht die Verbindung; Abschnitt 24 behandelt, was daraus folgt. [42]

Der höhere Wert für prozessbedingte Exposition ist für diesen Sachverhalt bedeutsam. Die Fußnote nennt als Beispiel das Schweißen. Ob ein Chromat, das ohne Energiezufuhr durch die Tätigkeit an der Grenzfläche entstanden ist und beim Ausbau als Staub frei wird, als prozessbedingt erzeugt gilt, sagt EH40 nicht. Eine Auslegungshilfe dazu habe ich nicht gefunden. Die Antwort entscheidet über einen Faktor 2,5 im anzuwendenden Grenzwert. [222]

Das Merkblatt INDG346 der Behörde nennt für Chrom(VI)-Verbindungen weiterhin 0,05 mg/m³. Das ist der Wert vor dem 17. Januar 2020. Die Behörde hat ihr eigenes Merkblatt nach der Absenkung nicht nachgezogen; abgerufen am 17. Oktober 2026 trägt es den alten Wert. Wer sich auf die allgemein zugängliche Veröffentlichung der Behörde verlässt, arbeitet mit dem Fünffachen des geltenden Grenzwertes. [88]

Die Europäische Union hat ihren verbindlichen Grenzwert für Chrom(VI) zum 17. Januar 2025 auf 0,005 mg/m³ abgesenkt. Das Vereinigte Königreich folgt dem nicht; die britische Behörde führt für Chrom(VI) weiterhin 0,01 mg/m³. Der britische Wert liegt damit beim Doppelten des unionsrechtlichen. [222, 41, 193]

EH40 führt für Chrom(VI) keine Hautkennzeichnung. Die Legende der Ausgabe fasst diese Kennzeichnung eng: „Sk Can be absorbed through the skin. The assigned substances are those for which there are concerns that dermal absorption will lead to systemic toxicity." Gemeint ist die systemische Wirkung nach Aufnahme über die Haut. Die örtliche Hautwirkung der Chromate, das Chromgeschwür und die allergische Kontaktdermatitis, fällt nicht darunter. Die Anmerkung „sen" trägt hier ebenfalls nicht weiter, weil dieselbe Legende sie auf „Capable of causing occupational asthma" begrenzt. Anhang III der Richtlinie 2004/37/EG führt für Chrom(VI) ebenfalls keinen Hinweis „Haut". Die Pflichten zum Hautschutz folgen damit aus Schedule 2A und Regulation 7 und nicht aus der Grenzwerttabelle. [222, 193]

Die H-Sätze lösen die Pflichten aus

Die Einstufungssätze sind im britischen Recht der Anknüpfungspunkt. Regulation 2(1) bestimmt den Gefahrstoff über die Kriterien der CLP-Verordnung und definiert diese in derselben Vorschrift als die Verordnung (EG) Nr. 1272/2008, deren Artikel 6 Absatz 5, 11 Absatz 3, 12, 14, 18 Absatz 3 Buchstabe b, 23, 25 bis 29 und 35 Absatz 2 sowie die Anhänge I bis VII „are to be read as amended from time to time". Regulation 7(7) Buchstabe c nennt dann einzelne Gefahrenhinweise im Wortlaut. Ziffer i erfasst einen Stoff mit „the hazard statement H340, H350 or H350i" oder einen in Schedule 1 aufgeführten Stoff oder ein dort aufgeführtes Verfahren, Ziffer ii einen Stoff mit „the hazard statement H334". [220]

Seit dem 1. Januar 2021 führt die britische Behörde HSE als GB CLP Agency eine eigene verbindliche Liste. Nach ihrer Darstellung sind „all existing EU harmonised classification and labelling in force on 31 December 2020, are assimilated into Great Britain as GB mandatory classification and labelling (GB MCL)". Für Nordirland gilt die Unionsfassung weiter, weil „substances and mixtures placed on the market in Northern Ireland are subject to the EU CLP Regulation". [224]

Indexnummer	Stoff	Einstufung und Gefahrenhinweise
024-008-00-9	Calciumchromat	Carc. 1B H350; Acute Tox. 4 H302; Aquatic Acute 1 H400; Aquatic Chronic 1 H410
024-017-00-8	Chrom(VI)-Verbindungen, Sammeleintrag ohne Bariumchromat und ohne die an anderer Stelle des Anhangs genannten Verbindungen	Carc. 1B H350i; Skin Sens. 1 H317; Aquatic Acute 1 H400; Aquatic Chronic 1 H410
024-018-00-3	Natriumchromat	Carc. 1B H350; Muta. 1B H340; Repr. 1B H360FD; Acute Tox. 2 H330; Acute Tox. 3 H301; STOT RE 1 H372; Acute Tox. 4 H312; Skin Corr. 1B H314; Resp. Sens. 1 H334; Skin Sens. 1 H317; Aquatic Acute 1 H400; Aquatic Chronic 1 H410, mit spezifischen Konzentrationsgrenzen von 0,2 Prozent für H334 und für H317

Damit greift Regulation 7(7) Buchstabe c Ziffer i bei allen drei Einträgen, bei Calciumchromat über H350, beim Sammeleintrag über H350i und bei Natriumchromat über H350 und H340. Bei Natriumchromat greift zusätzlich Ziffer ii über H334. [220, 223]

Die Aufzählung in Regulation 7(7) Buchstabe c nennt H317 nicht, und H314 nennt sie ebenfalls nicht. Die Hautsensibilisierung löst die Minimierungspflicht damit nicht aus. Sie macht den Stoff weiterhin zum gesundheitsgefährlichen Stoff nach Regulation 2(1) Buchstabe a, weil dieser jede Gesundheitsgefahrenklasse erfasst. Beurteilung nach Regulation 6 und Beherrschung nach Regulation 7(1) gelten unverändert, und Schedule 2A Buchstabe b verlangt die Berücksichtigung der Hautaufnahme. Das zusätzliche Regime hängt an Krebs, Keimzellmutagenität und Atemwegssensibilisierung. [220]

Für den hier behandelten Fall ist die Verteilung der Hinweise über die beiden Salze bedeutsam. Calciumchromat trägt in der britischen Liste weder H317 noch H334 noch H314. Natriumchromat trägt alle drei, dazu Reproduktionstoxizität und wiederholte Organschädigung. Beide entstehen an derselben Grenzfläche, je nach basischem Oxid des Dämmstoffs. Abschnitt 3 behandelt, was der Sammelbegriff an dieser Stelle verdeckt. [223]

Messung, Gesundheitsüberwachung und vierzig Jahre

Regulation 10(1) macht die Messung von einer Voraussetzung abhängig. Gemessen wird, wenn die Gefährdungsbeurteilung ergibt, dass die Messung „requisite" ist, um die angemessene Beherrschung aufrechtzuerhalten oder die Gesundheit der Beschäftigten zu schützen. Regulation 10(2) erlaubt den Verzicht, wenn der Arbeitgeber auf andere Weise nachweisen kann, dass die Anforderungen der Regulation 7(1) erfüllt sind. Eine Messpflicht dem Grunde nach besteht nicht. [220]

Regulation 10(4) verweist für bestimmte Stoffe und Verfahren auf Schedule 4 und Schedule 5 mit festen Messintervallen. Der einzige Chromeintrag dort lautet „Spray given off from vessels at which an electrolytic chromium process is carried on, except trivalent chromium", mit einem Intervall von vierzehn Tagen. Die galvanische Verchromung ist damit zwingend zu überwachen. Für Arbeiten an gedämmten Heißteilen gibt es keinen entsprechenden Eintrag. [220]

Regulation 10(5) regelt die Aufbewahrung. Ist die Aufzeichnung für die persönliche Exposition namentlich bestimmbarer Beschäftigter repräsentativ, so ist sie mindestens vierzig Jahre vom letzten Eintrag an verfügbar zu halten, in allen anderen Fällen mindestens fünf Jahre. Die vierzig Jahre entstehen also nur, wenn personenbezogen gemessen wurde. Ohne Messung entsteht kein Verzeichnis, aus dem sich eine Belastung später rekonstruieren ließe, und eine dem deutschen Expositionsverzeichnis nach § 10a der Gefahrstoffverordnung entsprechende Vorschrift kennt das COSHH-Regime nicht. [220, 181]

Regulation 11 regelt die Gesundheitsüberwachung. Sie ist zwingend, wenn der Beschäftigte einem in Schedule 6 genannten Stoff bei dem dort genannten Verfahren ausgesetzt ist, und außerdem, wenn eine erkennbare Krankheit oder gesundheitliche Beeinträchtigung mit der Exposition zusammenhängen kann, deren Eintritt unter den konkreten Bedingungen hinreichend wahrscheinlich ist und für deren Erkennung ein geeignetes, für den Beschäftigten risikoarmes Verfahren besteht. Schedule 6 nennt zu Chrom nur „Potassium or sodium chromate or dichromate. In manufacture." Calciumchromat kommt dort nicht vor, und die Einschränkung „in manufacture" erfasst die Instandhaltung einer gedämmten Anlage nicht. Der zwingende Weg über Schedule 6 ist damit versperrt; es bleibt der zweite Weg über die Voraussetzungen der Regulation 11(1) Buchstabe b. [220]

Regulation 11(3) verlangt eine Gesundheitsakte mit von der Behörde genehmigten Angaben, verfügbar zu halten mindestens vierzig Jahre vom letzten Eintrag an. Die Frist entspricht der deutschen und der unionsrechtlichen. Sie greift nur, wenn die Gesundheitsüberwachung überhaupt eröffnet ist. [220]

Regulation 9 verlangt, die Schutzmaßnahmen in wirksamem Zustand zu halten, und schreibt für Absauganlagen eine gründliche Prüfung mindestens alle vierzehn Monate vor, für Atemschutz außer Einwegausführungen eine gründliche Prüfung in geeigneten Zeitabständen. Die Aufzeichnungen über diese Prüfungen sind mindestens fünf Jahre aufzubewahren. [220]

Unterweisung und der Schutz Dritter

Regulation 12(1) verlangt vom Arbeitgeber, der Arbeiten ausführt, die einen Beschäftigten einem gesundheitsgefährlichen Stoff aussetzen können, geeignete und ausreichende Information, Anleitung und Unterweisung. Regulation 12(2) nennt die Inhalte, darunter die Namen der Stoffe und die mit ihnen verbundenen Risiken, den Zugang zu Sicherheitsdatenblättern, einschlägige Grenzwerte, die wesentlichen Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung, die zu treffenden Vorsichtsmaßnahmen, die Ergebnisse von Messungen und die zusammengefassten Ergebnisse der Gesundheitsüberwachung. [220]

Regulation 12(4) reicht über den eigenen Betrieb hinaus. Der Arbeitgeber hat sicherzustellen, dass jede Person, „whether or not his employee", die Arbeiten im Zusammenhang mit seinen Pflichten aus diesen Vorschriften ausführt, geeignete und ausreichende Information, Anleitung und Unterweisung erhält. Fremdfirmen und Einzelunternehmer, die an einer Anlage arbeiten, sind damit einbezogen. [220]

Dasselbe folgt aus dem Gesetz. Section 2(1) des Health and Safety at Work etc. Act 1974 verpflichtet jeden Arbeitgeber, so weit vernünftigerweise praktikabel Gesundheit, Sicherheit und Wohlergehen seiner Beschäftigten bei der Arbeit zu gewährleisten; Section 2(2) Buchstabe c nennt dabei Information, Anleitung, Unterweisung und Aufsicht. Section 3(1) erstreckt die Pflicht auf Personen, die nicht bei ihm beschäftigt sind und von seiner Tätigkeit betroffen sein können. Section 7 verpflichtet jeden Beschäftigten, angemessene Sorgfalt für sich und andere zu üben und mit dem Arbeitgeber bei der Erfüllung seiner Pflichten zusammenzuarbeiten. [219]

Aufsicht, Straftat und Meldepflicht

Die Aufsicht arbeitet mit zwei Anordnungsarten. Nach Section 21 kann ein Inspektor ein improvement notice erlassen, wenn eine Vorschrift verletzt wird, mit einer Frist zur Abhilfe. Nach Section 22 kann er ein prohibition notice erlassen, wenn eine Tätigkeit mit der Gefahr einer schweren Personenverletzung verbunden ist; das notice kann sofort wirksam werden und untersagt die Tätigkeit, bis die Mängel behoben sind. Eine behördliche Anzeige von Arbeiten mit Karzinogenen vor Beginn kennt das britische Recht nicht. [219]

Die Pflichten sind strafbewehrt. Abschnitt 30 gibt den Rahmen wieder: Verstöße nach Section 33(1) Buchstabe a und c sind wahlweise im summarischen oder im Anklageverfahren verfolgbar, im Anklageverfahren mit unbegrenzter Geldstrafe und Freiheitsstrafe bis zu zwei Jahren nach Schedule 3A. [112]

Die Strafzumessung für Unternehmen folgt einer eigenen Richtlinie. Die Leitlinie des Sentencing Council für Verstöße gegen die Arbeitgeberpflichten und gegen Arbeitsschutzvorschriften gilt seit dem 1. Februar 2016, zuletzt aktualisiert am 5. Oktober 2026. Sie bildet eine Matrix aus Verschuldensgrad und Schadenskategorie und staffelt die Bußgeldbereiche nach dem Umsatz des Unternehmens; der Gesamtrahmen reicht von 50 Pfund bis 10 Millionen Pfund. Der Eintritt eines Schadens ist keine Voraussetzung, weil die Leitlinie die Wahrscheinlichkeit des Schadens und die Zahl der Betroffenen eigenständig bewertet. [231]

Neben der Strafe steht die Kostenerstattung. Nach Regulation 23 und 24 der Health and Safety and Nuclear (Fees) Regulations 2022 stellt die Behörde die Kosten einer Intervention in Rechnung, wenn ein Inspektor eine wesentliche Verletzung einer Arbeitsschutzvorschrift feststellt, begrenzt auf die tatsächlich entstandenen angemessenen Kosten. Einen gesetzlich festgelegten Stundensatz gibt es nicht; die Behörde veröffentlicht ihn, mit Stand 1. April 2026 beträgt er 188 Pfund je Stunde. Regulation 24(13) nimmt Arbeiten, die unter einer Asbestlizenz ausgeführt werden, von dieser Kostenerstattung aus. Für Chrom(VI) besteht keine Lizenz und damit auch keine entsprechende Freistellung. [230]

Die Meldepflicht knüpft an die Diagnose an. Nach Regulation 9 der Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations 2013 hat der Arbeitgeber der Behörde zu melden, wenn ihm eine schriftliche Diagnose über eine der in Schedule 1 genannten Krankheiten vorliegt und die betroffene Person die zugehörige Tätigkeit ausübt. Schedule 1 Teil 1 Nummer 3 nennt beruflich bedingten Krebs. Regulation 8 erfasst Berufsdermatitis und Berufsasthma. Eine Meldung der Exposition als solche, ohne Diagnose, ist nicht vorgesehen. [226]

Abfall

Die Einstufung läuft über eine Verweisungskette. Regulation 4(1) der Hazardous Waste (England and Wales) Regulations 2005 bestimmt den Begriff des gefährlichen Abfalls über die Liste der Entscheidung 2000/532/EG in der jeweils geltenden Fassung. Die früher daneben stehenden List of Wastes (England) Regulations 2005 sind zum 1. Juli 2015 aufgehoben. Für Wales gilt eine eigene Verordnung aus dem Jahr 2005, für Schottland die Special Waste Regulations 1996 in der Fassung von 2004, für Nordirland die Hazardous Waste Regulations (Northern Ireland) 2005. [227, 238]

Die Abfallschlüssel sind dieselben wie auf dem Kontinent. Für ausgebaute Dämmung greift der Spiegeleintrag 17 06 03*, „other insulation materials consisting of or containing hazardous substances". Für Auskleidungen und feuerfeste Materialien kommen 16 11 03* und 16 11 05* in Betracht, für Chromate der Eintrag 16 09 02*. Ein Spiegeleintrag verlangt eine Prüfung der gefahrenrelevanten Eigenschaften; ohne Prüfung ist der Abfall nicht als nicht gefährlich eingestuft. [227]

Die Bewertungsschwelle steht in der technischen Anleitung WM3. Die gemeinsame Anleitung der Umweltbehörden von England, Wales, Schottland und Nordirland, erste Ausgabe in der Fassung v1.2.GB vom Oktober 2021, setzt für die gefahrenrelevante Eigenschaft HP 7, krebserzeugend, bei Stoffen der Kategorie 1A oder 1B mit H350 eine Konzentrationsgrenze von 0,1 Massenprozent. Die Anleitung kennt für diese Eigenschaft keine Berücksichtigungsgrenze, unterhalb derer ein Gehalt außer Betracht bliebe. [228]

Für den Umgang gilt ein Vermischungsverbot. Regulation 19 der Hazardous Waste Regulations untersagt das Vermischen verschiedener Kategorien gefährlicher Abfälle sowie das Vermischen gefährlicher mit nicht gefährlichen Abfällen, und Regulation 20 bestimmt die Ausnahmen und die Pflicht zur Trennung, soweit technisch und wirtschaftlich durchführbar. Ein ausdrückliches Verdünnungsverbot nach dem Muster des deutschen § 9a des Kreislaufwirtschaftsgesetzes enthält die Verordnung nicht. Die Regulations 35 und 36 verlangen für jede Beförderung einen consignment note mit Angaben zu Erzeuger, Abfallschlüssel und Bestimmungsort. [227, 190]

Darüber liegt die allgemeine Sorgfaltspflicht. Section 34 des Environmental Protection Act 1990 verpflichtet jeden, der Abfall erzeugt, befördert, behandelt oder entsorgt, zu angemessenen Maßnahmen, damit der Abfall nicht unerlaubt behandelt wird, nicht entweicht und nur an befugte Personen mit einer zutreffenden schriftlichen Beschreibung übergeben wird. Die zutreffende Beschreibung setzt die zutreffende Einstufung voraus. [229]

Stoffrecht: GB CLP und UK REACH

Seit dem 1. Januar 2021 führt die Behörde HSE als GB CLP Agency eine eigene verbindliche Einstufungsliste. Die GB mandatory classification and labelling list, veröffentlicht am 17. Februar 2025 und zuletzt aktualisiert am 22. September 2025, enthält Calciumchromat unter der Indexnummer 024-008-00-9 als Carc. 1B mit H350, Natriumchromat unter 024-018-00-3 und den Sammeleintrag für Chrom(VI)-Verbindungen unter 024-017-00-8 mit H350i. Die Einstufungen entsprechen damit den unionsrechtlichen. [223]

Das Zulassungsrecht fällt auseinander. In UK REACH führt Anhang XIV Natriumchromat unter Eintrag 22. Calciumchromat steht weder in Anhang XIV noch auf der Kandidatenliste. Keine der Beschränkungen erfasst die in-situ-Bildung an einem Bauteil. Die Zulassungspflicht knüpft ohnehin an die Verwendung eines in den Verkehr gebrachten Stoffes an und nicht an das, was an der Grenzfläche entsteht; Abschnitt 25 behandelt diesen Punkt. Die nach EU-REACH erteilten Zulassungen für Chrom(VI)-Stoffe sind nach Angabe der Behörde am 21. September 2024 ausgelaufen. [225]

Ein dem von der ECHA im April 2025 vorgeschlagenen unionsweiten Verwendungsverbot entsprechendes britisches Verfahren ist mir nicht bekannt. Der britische Stand ist damit: Einstufung wie in der Union, Zulassung und Beschränkung enger. [225, 196]

Der Abstand zum Asbestregime

Die Control of Asbestos Regulations 2012 zeigen, was eine Rechtsordnung für ein anerkanntes Verfahrensrisiko vorschreibt. Regulation 5 verlangt vor Abbruch-, Instandhaltungs- und ähnlichen Arbeiten die Feststellung von Vorhandensein, Art und Zustand des Asbests und bestimmt für den Zweifelsfall, dass seine Anwesenheit zu unterstellen ist. Regulation 6 verlangt die Aufzeichnung der wesentlichen Ergebnisse unabhängig von der Betriebsgröße. Regulation 7 verlangt einen schriftlichen Arbeitsplan mit vorgeschriebenem Mindestinhalt. [123, 232]

Weiter geht es mit Lizenz und Anzeige. Regulation 8 macht die lizenzpflichtigen Arbeiten von einer Erlaubnis der Behörde abhängig, mit einem Antragsvorlauf von 28 Tagen und einer Geltungsdauer von höchstens drei Jahren. Regulation 9 verlangt die Anzeige lizenzpflichtiger Arbeiten vierzehn Tage vor Beginn. Regulation 10 schreibt die Unterweisungsinhalte in elf einzeln benannten Punkten vor, von den Eigenschaften des Stoffes über Dekontamination und Abfallhandhabung bis zu den Notfallverfahren. [232]

Messung und Freigabe sind formalisiert. Regulation 19 verlangt die Messung der Asbestfaserkonzentration in regelmäßigen Abständen und bei jeder Änderung, die die Exposition beeinflussen kann. Regulation 20 und Regulation 21 verlangen für Messung, Freigabebescheinigung und Probenanalytik die Akkreditierung nach ISO 17025 und für die Freigabe zusätzlich nach ISO 17020. Die Anleitung HSG248 in der zweiten Ausgabe vom Mai 2021 beschreibt das Freigabeverfahren in vier Stufen und setzt für die Luftprobe in der Einhausung ein zahlenmäßiges Kriterium: alle Ergebnisse müssen unter 0,010 Fasern je Milliliter liegen. [232, 233]

Für Chrom(VI) besteht von alledem nichts. Es gibt keine Ermittlungspflicht vor der Wartung und keine Vermutungsregel, keinen vorgeschriebenen Arbeitsplan, keine Lizenz, keine Anzeige, keinen Katalog von Unterweisungsinhalten, keine Messpflicht dem Grunde nach, keine akkreditierten Laboratorien, kein Freigabeverfahren und kein Reinheitskriterium für die Wiederfreigabe einer Fläche oder eines Bauteils. Beide Stoffe sind nach derselben Vorschrift Karzinogene der Kategorie 1A oder 1B. Die Verfahrenstiefe unterscheidet sich vollständig. [220, 232]

Was das britische Regelwerk benennt

Kein britischer Rechtsakt nennt die Chromatbildung an gedämmten chromlegierten Heißteilen. Der einzige Chromeintrag in den Messintervallen der COSHH Regulations betrifft die galvanische Verchromung, der einzige Chromeintrag in der Gesundheitsüberwachung die Herstellung von Kalium- und Natriumchromat. Dämmung, Hochtemperatur und Heißteile kommen in der Verordnung nicht vor. Die Abfallliste erfasst den Sachverhalt nur über den Spiegeleintrag für Dämmmaterial, ohne Chrom zu nennen. [220, 227]

Die Veröffentlichungen der Behörde bleiben dahinter zurück. Der zugehörige Approved Code of Practice L5 in der sechsten Ausgabe 2013 erfasst in den Absätzen 57, 69 und 87 ausdrücklich Stoffe, die als Abfall oder Nebenprodukt entstehen oder aus Verfahren freigesetzt werden; eine Textsuche nach „insulat" ergibt in diesem Dokument keinen Treffer. Chrom erscheint dort bei Galvanik und Chromatherstellung. Das Merkblatt INDG346 zählt unter der Frage, wo Chrom(VI) vorkommt, die Herstellung und Verwendung von Edelstahl und anderen Chromlegierungen samt Schweißen und Schneiden, Pigmente für Farben und Keramik, Katalysatoren, Farbstoffherstellung, Ledergerbung und Galvanik auf. Die Dämmung fehlt in dieser Aufzählung. Eine Veröffentlichung der Behörde, die den Entstehungsweg benennt, habe ich nicht gefunden. [221, 88]

Benannt ist der Sachverhalt von anderer Seite. Das Safety Bulletin Summary des britischen Branchenverbandes Energy UK vom September 2019 beschreibt ihn vollständig. Es nennt als Orte Hochdruck-Dampfleitungen, Brennkammerbauteile und Abgaswege von Gasturbinen, wenn calciumhaltige Dämmung oder calciumhaltige Trennmittel verwendet werden, und hält als Entstehungsbedingungen fest: „1. Calcium based product is present 2. Temperatures greater than 300°C 3. Chromium Steel is present." Es weist auf die gelbe, schwefelähnliche Verfärbung hin, die unter Natriumdampflicht schlecht zu erkennen ist, und empfiehlt, an allen Kraftwerken von der Anwesenheit von Chrom(VI) auszugehen. Abschnitt 26 behandelt die dort genannte Praxis mit Kriechöl. [92]

Hinzu kommen zwei Fachstellen. Das arbeitsmedizinische Forschungsinstitut IOM nennt in einem undatierten Merkblatt „calcium containing insulation systems" unter den Vorkommen und hält fest: „Cr VI dust can be commonly found on high-temperature insulated parts such as large engines." Das Energy Institute führt in seiner Toolbox eine Seite, die die Bildung an Edelstahl im Kontakt mit calciumoxidhaltigen Materialien wie Gewindedichtmitteln oder Dämmung beschreibt und auf die Zunahme bei erhöhten Temperaturen hinweist; das Material ist nach Angabe der Seite von Energy Safety Canada übernommen. [234, 235]

Der zuständige Fachverband schweigt. Die Thermal Insulation Contractors Association veröffentlicht unter ihren technischen Unterlagen Material zu Brandschotts, Rohrdurchführungen, Wärmepumpen und Außenluftkanälen. Zu Chrom(VI) oder Chromaten findet sich dort nichts. Der Schulungsanbieterverband UKATA führt einen Lehrplan zur Chrom(VI)-Sensibilisierung, der Schweißen, Galvanik, Pigmentherstellung, Gießerei und Beschichtungsentfernung nennt und die Dämmung auslässt. Die Unternehmen, die diese Arbeiten ausführen, erhalten ihre Branchenunterlagen damit ohne den hier behandelten Entstehungsweg. [236, 237]

Die Lage ist damit die folgende. Der Mechanismus ist im Vereinigten Königreich seit September 2019 benannt, mit Schwellentemperatur und Reaktionspartner, in einem Mitgliederpapier eines Branchenverbandes der Stromerzeugung, das auf der Website dieses Verbandes nicht auffindbar ist. Die Behörde hat ihn in keiner ihrer Veröffentlichungen aufgegriffen. Das Fehlen eines behördlichen Hinweises ändert an den Pflichten nichts, weil diese am Stoffbegriff und nicht an einer Liste hängen. [92, 220]

Was daraus für einen Betrieb im Vereinigten Königreich folgt

Die Pflichten beginnen vor der Arbeit. Regulation 6(1) verbietet den Beginn ohne geeignete und ausreichende Beurteilung, und Regulation 6(2) Buchstabe e nennt die Wartung mit dem Potential hoher Exposition als eigenen Beurteilungsgegenstand. Eine Beurteilung, die den Entstehungsweg an gedämmten chromlegierten Heißteilen nicht betrachtet, obwohl die Bauteilwerkstoffe und die Betriebstemperaturen bekannt sind, erfüllt diese Anforderung nicht. [122]

Die Maßnahmen folgen einer festen Rangfolge. Zu prüfen ist zuerst der Ersatz nach Regulation 7(2), dann die Gestaltung von Verfahren und Beherrschung an der Quelle nach Regulation 7(3), und erst danach die persönliche Schutzausrüstung. Für Karzinogene treten die Maßnahmen der Regulation 7(5) hinzu, von der Einhausung bis zur Reinigung der Oberflächen. Dazu gehört bei einem Stoff mit H350 oder H350i die Minimierung auf das vernünftigerweise praktikable Mindestmaß nach Regulation 7(7) Buchstabe c, die zusätzlich zum Grenzwert gilt. Wer die Substitution für nicht praktikabel hält, trägt dafür nach Section 40 des Gesetzes im Verfahren die Beweislast. [113, 220, 219]

Beim Grenzwert ist der Stand zu beachten. Maßgeblich ist EH40 in der vierten Ausgabe 2020 mit 0,01 mg/m³ als Achtstundenmittelwert, nicht der Wert von 0,05 mg/m³ aus dem nicht nachgezogenen Merkblatt der Behörde. Die Einhaltung des Grenzwertes beendet die Pflichten nicht, weil Regulation 7(7) die Minimierung daneben stellt und Schedule 2A die Berücksichtigung von Haut und Verschlucken verlangt. [222, 220]

Die Dokumentation richtet sich nach der Betriebsgröße. Ab fünf Beschäftigten sind die wesentlichen Ergebnisse der Beurteilung und die getroffenen Schritte nach Regulation 6(4) aufzuzeichnen. Wird personenbezogen gemessen, so sind die Aufzeichnungen vierzig Jahre verfügbar zu halten. Dazu gehört die Prüfung, ob die Gesundheitsüberwachung nach Regulation 11(1) Buchstabe b eröffnet ist, weil der Weg über Schedule 6 für diesen Sachverhalt nicht offensteht. [220]

Die Unterweisung reicht über die eigene Belegschaft hinaus. Nach Regulation 12(4) ist jede Person einzubeziehen, die Arbeiten im Zusammenhang mit den Pflichten des Arbeitgebers ausführt, ob beschäftigt oder nicht. Dazu gehören die Dämmunternehmen, die Instandhaltungsfirmen und die Einzelunternehmer, die an derselben Anlage tätig sind. Section 3(1) des Gesetzes verpflichtet den Betreiber zusätzlich gegenüber jedem, der von seiner Tätigkeit betroffen sein kann. [220, 219]

Der Abfall ist vor der Entsorgung einzustufen. Ausgebaute Dämmung fällt unter einen Spiegeleintrag, dessen Einstufung eine Prüfung verlangt; die Schwelle für die krebserzeugende Eigenschaft liegt nach WM3 bei 0,1 Massenprozent. Dazu gehören die Trennung nach Regulation 19 und 20 und der consignment note nach Regulation 35 und 36. Die schriftliche Beschreibung nach Section 34 des Environmental Protection Act 1990 muss zutreffen. [227, 228, 229]

Eine behördliche Benennung ist nicht abzuwarten. Die Pflichten aus Regulation 2(1), 6 und 7 hängen an der Stoffeigenschaft und greifen unabhängig davon, ob die Behörde den Entstehungsweg in einer Veröffentlichung aufführt. Die Beweislastregel der Section 40 wirkt in derselben Richtung, weil sie den Nachweis der Grenze des Praktikablen dem Arbeitgeber auferlegt. Für die Stromerzeugung liegt die Information seit September 2019 im eigenen Branchenverband vor. [220, 219, 92]

37. Anhang: Dämmstoffe mit basischen Oxiden und ihre Einsatzorte

Folgende handelsübliche Dämmstoffe enthalten die beschriebenen basischen Oxide, die eine thermochemische In-situ-Bildung der beschriebenen Chrom(VI)-Verbindungen auslösen können. Es handelt sich dabei nicht um Vermutungen, sondern um Ableitungen aus Herstellerangaben, Warnmeldungen von Anwendern und eigenen Feldbeobachtungen.

Die Belegspalte nennt die Herkunft der Angabe. H steht für eine Hersteller- oder Normangabe, W für eine Warnmeldung oder einen Anwenderhinweis, F für eine eigene Feldbeobachtung. Wo ein Hersteller keine Zahlen veröffentlicht, steht das ausdrücklich in der Tabelle.

Die Gehaltsangaben beziehen sich auf die Oxidanalyse des Dämmstoffs im Lieferzustand. Ob und in welchem Umfang die Oxide an der Grenzfläche verfügbar werden, ist Gegenstand der Abschnitte 9 bis 12 dieser Analyse.

Dämmstoffe mit Gehalt an Calcium-, Natrium- und weiteren basischen Oxiden

Material und Handelsform	Belegter Gehalt an basischen Oxiden	Beleg
E-Glas, Garn und Gewebe für Leiterplatten und Luftfahrt	CaO 16 bis 25 %, MgO 0 bis 5 %, Na_2O und K_2O 0 bis 2 %	H [151]
E-Glas, allgemeine Anwendungen: Gewebe, Band, Nadelmatte, Roving	CaO und MgO zusammen 16 bis 30 %, Alkalimetalloxide 0 bis 2 %	H [151]
E-Glas, Herstellerangabe zu Textilfasern und Geweben	CaO 16 bis 25 %, Na_2O und K_2O 0 bis 1 %, MgO 0 bis 5 %	H [152]
ECR-Glas, borfreie Modifikation des E-Glases	keine eigene Oxidtabelle veröffentlicht; die Norm definiert ECR nur als borfreie E-Glas-Modifikation	H [151]
Mineralwolle, Stein- und Glaswolle: Matte, Drahtnetzmatte, Platte, Rohrschale	Na_2O, K_2O, CaO, MgO und BaO zusammen über 18 Gewichtsprozent; der Wert ist Teil der Stoffidentität nach Anhang VI Index 650-016-00-2, nicht eine Chargeneigenschaft	H [153]
AES-Wolle, Stoffdefinition der Hersteller	Calciumoxid und Magnesiumoxid zusammen 18 bis 43 %, Siliciumdioxid 50 bis 82 %	H [154]
AES-Wolle, Matte (Superwool Plus Blanket)	CaO 26 bis 32 %, MgO 3 bis 7 %	H [154]
AES-Wolle, Platte (Superwool Plus Board)	CaO und MgO zusammen 31 %	H [154]
AES-Wolle, Matte (Insulfrax LT)	CaO 27 bis 33 %, MgO 2,5 bis 6,5 %	H [155]
AES-Wolle, Matte (Insulfrax 1300 HT)	CaO und MgO zusammen 21 bis 27 %	H [155]
AES-Wolle, Magnesiumsilikatvariante (Isofrax)	MgO 18 bis 27 %, kein deklarierter CaO-Anteil	H [155]
Aluminiumsilikatwolle und Keramikfaser (ASW, RCF): Matte, Platte, Papier, Modul	Na_2O, K_2O, CaO, MgO und BaO zusammen kleiner oder gleich 18 Gewichtsprozent; Trennwert zu Index 650-016-00-2. Die Herstellerdatenblätter beziffern Alkali- und Erdalkalioxide nicht	H [157, 78, 156]
Calciumsilikat, Platte und Formteil	CaO 38 bis 43 %	H [158]
Calciumsilikat, Rohrschale und Block	synthetisches Calciumsilikat mindestens 90 %; eine Aufteilung in CaO und SiO_2 wird nicht veröffentlicht	H [159]
Perlit, expandiert: Schüttung und Formteil	Na_2O 3,7 %, K_2O 5,3 %, CaO 0,5 %, MgO 0,1 %. Die Analyse stammt von einem Filterperlit; für Rohrleitungs- und Tankdämmstoffe veröffentlichen die Hersteller keine Oxidanalyse	H [160]
Vermiculit, expandiert: Schüttung und Platte	MgO 21,5 bis 25,5 %, K_2O 3 bis 6 %, CaO 2,0 bis 6,0 %; das Datenblatt führt zusätzlich Cr_2O_3 mit 0,01 bis 0,15 %	H [161]
Aerogelmatte	keine Calcium- und keine Natriumverbindung deklariert; über 50 % Textilglas ohne chemische Spezifikation	H [162]

Material und Handelsform	Belegter Gehalt an basischen Oxiden	Beleg
Silikat- und Quarzglasgewebe über 96 % SiO_2: Gewebe und Nadelmatte	96 bis 99 % amorphe Kieselsäure; der Rest von 1 bis 4 % wird nicht aufgeschlüsselt	H [163]
Basaltfaser, Gewebe und Nadelmatte	keine Oxidaufschlüsselung veröffentlicht; der Hersteller nennt nur eine besondere Oxidzusammensetzung	H [164]
Keramikfaserpapier und Keramikfaserfilz	Bindemittel 2 bis 15 % organisch oder 50 bis 70 % anorganisch; die Stoffidentität des anorganischen Bindemittels wird nicht genannt	H [156]
Montagepaste für Heißteile, calciumhaltig	Calciumhydroxid 10 bis unter 20 Massenprozent	H [165]

Zwei Zeilen verdienen eine Anmerkung. Die Stoffdefinition der Mineralwolle und die der Keramikfaser sind über denselben Oxidgehalt gegeneinander abgegrenzt: über 18 Gewichtsprozent führt zur Mineralwolle, bis einschließlich 18 Gewichtsprozent zur Keramikfaser. Der Gehalt an basischen Oxiden ist damit kein Nebenmerkmal, sondern das Unterscheidungsmerkmal der beiden Stoffgruppen. Und die Summenformel des Anhangs VI nennt Natrium-, Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Bariumoxid ausdrücklich. [153, 157]

Applikationen mit diesen Dämmstoffen

Anwendungsfeld	Gedämmte Bauteile, Dämmstoff und Handelsform	Temperatur	Beleg
Yachten und Superyachten	Abgasleitung, Abgassammler, Trockenturbolader und Indikatorventile; Dämmmatte mit aufgenieteter Blechverkleidung, metallische Isolierverkleidung in Kassettenbauweise, abnehmbare textile Isolierschalen. Abnehmbare Abschnitte sind für die Wartung ausdrücklich vorgesehen	Oberfläche unter 220 °C gefordert; Bauteile im Motorraum bis 750 °C	H [166, 167]
Containerschiffe und Handelsschiffe, Zweitaktmotor	Abgassammler und Abgasleitungen; Dämmung mit Abdeckung aus verzinktem Blech	im Dokument nicht genannt	H [168]
Containerschiffe und Handelsschiffe, Viertaktmotor	Abgasleitung vom Turboladeraustritt über Abgaskessel und Schalldämpfer bis zum Kamin, dazu die SCR-Anlage; Dämmpolster am Turbolader, durchgehende Dämmung ab 30 mm Dicke mit Deckblech, SCR-Dämmung demontierbar ausgeführt	Turbinenaustritt 390 °C im Normalbetrieb, 450 °C in der Auslegung, 554 °C im Notbetrieb	H [168, 169]
Kreuzfahrtschiffe	Hilfsdiesel, Abgasleitungen und Abgasreinigung; gleiche Motorenbaureihen und gleiche Dämmausführung wie im Viertaktbetrieb der Handelsschifffahrt, abnehmbare Matratzen an Armaturen	wie Viertaktmotor	F

Anwendungsfeld	Gedämmte Bauteile, Dämmstoff und Handelsform	Temperatur	Beleg
Lokomotiven und Schienenfahrzeuge	Abgasturbolader, Abgaskrümmer, ganze Abgasstrecken und Abgasnachbehandlung; textiles Isolierformteil nach der Brandschutznorm EN 45545, Integraldämmung mit Außenschale aus Edelstahlfolie oder Feinblech, genähte Dämmmatten mit Erdalkalisilikat, E-Glas oder Silika als Dämmstoff und Edelstahlfolie oder Nickelbasisfolie auf der Heißseite, ausdrücklich abnehmbar und wiederverwendbar	Formteil bis 650 °C; Mattentypen bis 816 °C und bis 1.149 °C	H [167, 170]
Baumaschinen und mobile Arbeitsmaschinen	Turbolader, Krümmer, Abgasstrang, Partikelfilter- und SCR-Module, Unterbodendämmung und Motorraum-Hitzeschutz; dreidimensionale Faserformteile mit Außenschalen aus Edelstahlfolie oder Feinblech	Bauteile bis 750 °C, Reduktion der Oberfläche unter 220 °C	H [167]
Blockheizkraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplung	Abgasstrang und Abgasturbolader des Gasmotors; metallische Isolierverkleidung als komplett abnehmbare Module	Abgas 421 °C bei Volllast, 476 °C bei halber Last	H [171, 167]
Netzersatz- und Notstromanlagen, auch in Rechenzentren	Abgasleitung des Dieselaggregats; Calciumsilikat- oder Mineralwolle-Rohrschalen, zweilagig verlegt, mit Mantel, Bandagen und Bindedraht aus Edelstahl 304. Der Hersteller empfiehlt für diesen Fall ausdrücklich Calciumsilikat, weil das organische Bindemittel der Mineralwolle ab etwa 177 °C ausbrennt	371 °C bis annähernd 538 °C	H [172]
Gas- und Dampfturbinen	Abgaskanal, Übergangsstück, Turbinengehäuse, Abhitzekessel, Schalldämpfer und Kamin; Innendämmung hinter Linerblechen aus 304er oder 409er Stahl, flexible Dämmkissen, Faserdämmmatten und Fasermodule im Abhitzekessel, Dämmmatratzen am Gehäuse, abnehmbar und wiederverwendbar	Gehäuse über 500 °C, Abgaskanal über 480 °C, Abhitzekessel bis 1.093 °C	H [173], W [174]
Straßenfahrzeuge, Lastkraftwagen und Personenkraftwagen	Hitzeschilde, Gusskrümmer, Abgasstrang, Partikelfilter, SCR und Lagerungsmatten im Katalysator; Hitzeschild in Kassettenbauweise mit Deckblech oder Folie aus Edelstahl oder Aluminium und innenliegender Dämmeinlage, Nadelmatte als Lagerungsmatte	Hitzeschild bis 1.100 °C je nach Material; Krümmerspitzentemperatur 1.000 °C	H [175, 176, 177, 48]
Industrieöfen, Kessel, Müllverbrennung und Biomasseanlagen	Kesselwände, Rauchgaskanäle und Rohrleitungen; Steinwolle-Drahtnetzmatten mit verzinktem oder Edelstahl-Drahtgeflecht	bis 640 °C, schwere Ausführung bis 649 °C	H [178]
Chemieanlagen und Raffinerien	Rohrleitungen an austenitischen Stählen, Armaturen und Flansche; Drahtnetzmatten, Rohrschalen und abnehmbare Hauben	bis 640 °C, Rohrschalen bis 650 °C	H [178]

Die Werkstoffseite ist in denselben Unterlagen beziffert. Nichtrostender Stahl beginnt nach der europäischen Werkstoffnorm bei 10,5 Prozent Chrom. Für Krümmer, Rohr, Katalysator und Schalldämpfergehäuse nennt ein Hersteller den ferritischen Werkstoff 1.4509 mit 17,80 Prozent Chrom und Oxidationsbeständigkeit bis 950 °C sowie 1.4521 mit 19 Prozent Chrom bis 1.025 °C; die Spitzentemperatur am Krümmer gibt derselbe Hersteller mit 1.000 °C an. Im Abgaskanal der Gasturbine bestehen die Linerbleche aus 304er oder 409er Stahl, die Befestigung aus 304. An der Abgasleitung des Notstromaggregats bestehen Mantel, Bandagen und Bindedraht aus 304. [177, 174, 172]

Damit liegen beide Seiten der in Abschnitt 9 beschriebenen Reaktion in denselben Bauteilen nebeneinander vor: der chromlegierte Stahl als Chromquelle und der Dämmstoff als Träger der basischen Oxide. Die Tabellen sagen nichts darüber aus, in welchem Umfang die Reaktion im Einzelfall abläuft. Sie sagen, wo die Voraussetzungen dafür gegeben sind.

38. 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 ECFIA-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/acs.chemrestox.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 M0116139-01, 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/08.25/de. Vorgelegte englische Fassung.

16. Rockwool Technical Insulation: Hinweise zur sicheren Verwendung: ProRox WM Drahtnetzmatten 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 13_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 83 (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 Heißteilanwendungen. 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. WTERT 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 (GMBl 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 GMBl 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 1: 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, KanzKat 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

115. Vattenfall Generation NL: Instructie voorkomen blootstelling aan Chroom(VI); erste Fassung 18. Februar 2019, Gesamtaktualisierung 29. April 2024; Abschnitte 1, 5.1 und 5.4 sowie Versionsverlauf.

116. iTanks Live, gastgebend das Chroom 6 Informatie Kennis Centrum (CIKC): Veranstaltung „Chroom-6 verbindingen onder thermische isolatie", 6. November 2025; Pitches Ecopoint (Chrome-6 Neutralizer PR269 mit Zertifikat SEEF B.V., August 2025), Econtras (Isolatiebedrijf C.J. van Waas BV) und Sherwin Williams.

117. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU, Deutschland): Chrom(VI)-Verbindungen an Edelstahl; Abruf 13. Oktober 2026. Quelle

118. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), Anhang XVII Eintrag 47: Chrom(VI)-Verbindungen; Grenzwert 0,0002 Prozent löslicher Chrom(VI) der Trockenmasse des Zements. Quelle

119. Kronos Ecochem: Technische Information 6, Chromatreduktion im Zement mit Eisen-II-sulfaten; Dosierung, Haltbarkeit und Prüfung nach EN 196-10. Abruf 13. Oktober 2026. Quelle

120. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 26. November 2010, § 5a Besondere Mitwirkungs- und Informationspflichten für Veranlasser von Tätigkeiten an baulichen oder technischen Anlagen, § 6 Absätze 2a bis 2c und Absatz 8 sowie § 7 Absatz 1; § 5a eingefügt durch Verordnung vom 2. Dezember 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 384), Fassung zuletzt geändert am 17. Dezember 2025. Abgerufen am 14. Oktober 2026. Quelle

121. Arbeidsomstandighedenbesluit (Niederlande), Artikel 4.1b Absatz 2, Artikel 4.2 Absätze 1, 3, 7 und 8 sowie Artikel 4.54a Absatz 1 (Asbestinventarisatie). Abgerufen am 14. Oktober 2026. Quelle

122. The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (SI 2002/2677, Vereinigtes Königreich), Regulation 6, Assessment of the risk to health created by work involving substances hazardous to health. Abgerufen am 14. Oktober 2026. Quelle

123. The Control of Asbestos Regulations 2012 (SI 2012/632, Vereinigtes Königreich), Regulation 5, Identification of the presence of asbestos. Abgerufen am 14. Oktober 2026. Quelle

124. 29 CFR 1926.1126 (Vereinigte Staaten), Chromium (VI), Absatz (d) Exposure determination, Unterabsätze (d)(1), (d)(2), (d)(2)(vi) und (d)(3). Abgerufen am 14. Oktober 2026. Quelle

125. 29 CFR 1926.1101 (Vereinigte Staaten), Asbestos; Begriffsbestimmung „presumed asbestos containing material" in Absatz (b), initial exposure assessment nach (f)(2)(i) sowie Pflichten der Gebäude- und Anlageneigentümer nach (k)(2)(i) und Widerlegung nach (k)(5).

126. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU, Deutschland): Betriebsanweisung gemäß § 14 der deutschen Gefahrstoffverordnung, „Ausbau chromatbelasteter Dämmstoffe", Gefahrstoffinformationssystem WINGIS; deutsche Druckfassung vom 14. Oktober 2026 und niederländische Druckfassung vom 20. September 2026.

127. Eco-Point International BV, Roosendaal (Niederlande): Produktseite Chrome-6 Neutralizer, deutschsprachige Fassung; Abruf 14. Oktober 2026. Quelle

128. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe: Begründung „Chrom(VI)-Verbindungen (einatembare Fraktion)", MAK-Begründungen, 53. Lieferung 2012; Abschnitte 1, 2, 4.4.1 sowie der Abschnitt zu beruflichen und außerberuflichen Kontaktmöglichkeiten.

129. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses, Frankreich): Avis zur Stoffbewertung von Chrom(III)-oxid (EG-Nr. 215-160-9, CAS-Nr. 1308-38-9) im Rahmen der REACH-Verordnung, Saisine 2019-SA-0070, 28. Juli 2021. Quelle

130. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, GisChem: Datenblatt Chrom(III)-oxid, CAS-Nummer 1308-38-9; Arbeitsplatzgrenzwert, Überschreitungsfaktor und Angabe zur CLP-Einstufung. Abruf 14. Oktober 2026. Quelle

131. MATinspired B.V. (Niederlande): Produktseite TK20 Chromium-6 Neutralizer. Abruf 14. Oktober 2026. Quelle

132. MATinspired B.V. (Niederlande): FAQ TK20 Chromium-6 Neutralizer, Fragen 4.1 bis 4.13. Abruf 14. Oktober 2026. Quelle

133. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: DGUV Regel 112-189, Benutzung von Schutzkleidung (vormals BGR 189); Abschnitt 6.1 und Anhang 2. Quelle

134. Caterpillar Inc.: 35th Anniversary of the Cat 3500 Series Large Engine; Feldbestand von 190.000 Motoren und 3 Milliarden Betriebsstunden, 5. September 2016. Quelle

135. Rolls-Royce Power Systems: Rolls-Royce celebrates 25 years of excellence with its mtu Series 2000 and Series 4000; über 100.000 verkaufte Motoren, 2021. Quelle

136. [redacted] Group Holding: Registrierungsunterlage Form S-1/A bei der US-Wertpapier- und Börsenaufsicht SEC, Mai 2026; aktive installierte Basis von rund 44 GW zum 31. Dezember 2025. Quelle

137. Wärtsilä Corporation: Wärtsilä Energy, Unternehmenspräsentation 2025; 79 GW gelieferte Kraftwerksleistung in 180 Ländern. Quelle

138. GE Vernova: Aeroderivative and Heavy-Duty Gas Turbines, Produktseite; über 7.000 Gasturbinen, mehr als 800 GW in über 120 Ländern. Abruf 14. Oktober 2026. Quelle

139. Global Energy Monitor: Global Coal Plant Tracker, Fassung Juli 2026; über 2.200 GW in Betrieb, Erfassungsschwelle 30 MW. Quelle

140. Global Energy Monitor: Global Oil and Gas Plant Tracker, Fassung August 2026; 16.559 erfasste Blöcke. Quelle

141. Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung (UNCTAD): Review of Maritime Transport; rund 109.000 Schiffe ab 100 Bruttoregistertonnen. Quelle

142. Verband der Europäischen Automobilhersteller (ACEA): Vehicles on European roads, Januar 2026; Bestandszahlen für die Europäische Union und Europa, Stand 2024. Quelle

143. Deutsche Automobil Treuhand (DAT): DAT-Report 2026; 0,35 Reparaturen je Pkw und Jahr im Jahr 2025. Quelle

144. Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP): Waste-to-Energy in Europe in 2022, Anlagenkarte; 498 Anlagen in Betrieb. Quelle

145. Waste Management World: Energy from Waste, The State of Waste-to-Energy in the US, 10. Mai 2023; 75 Anlagen. Quelle

146. Nature Communications: Efficiency hierarchy and optimization of waste incineration in China to balance disposal and energy supply; 975 Anlagen mit 2.151 Verbrennungslinien zum Jahresende 2023. Quelle

147. Umweltministerium Japan: Municipal solid waste generation and disposal in FY2024, Stand 31. März 2025; 991 Verbrennungsanlagen, davon 415 mit Stromerzeugung. Quelle

148. RS Motor: [redacted] gas engines, typical intervals for preventive maintenance; Zwischenwartungen alle 10.000 Betriebsstunden, Überholungen bei 30.000 und 60.000 Betriebsstunden. Abruf 14. Oktober 2026. Quelle

149. Verfahrensbeschreibung der Trockensorption in der Rauchgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen; Sorbentien, Eindüsstellen, Rauchgastemperaturen von 130 bis 200 °C und stöchiometrische Überschüsse. Abruf 15. Oktober 2026. Quelle

150. Warnecke, R.; Müller, V.; Langer, S.; Wiedl, A.: Direktentschwefelung am Kohlekessel 1 des Gemeinschaftskraftwerks Schweinfurt; 7. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Dresden, Oktober 2015; Eindüsung calciumhaltiger Sorbentien in den Feuerraum bei etwa 900 °C oder in die Kesselzüge bei etwa 350 °C, Dosierraten 140 bis 375 kg/h. Quelle

151. ASTM International: ASTM D578/D578M-18, Standard Specification for Glass Fiber Strands; genehmigte Fassung vom 1. Juli 2018, veröffentlicht August 2018, DOI 10.1520/D0578-18. Abschnitte 4.1 bis 4.4 mit den Zusammensetzungstabellen 4.2.1 und 4.2.2 sowie der Begriffsbestimmung zu E-CR-Glas in 4.2.4; ausgewertet nach der öffentlich abrufbaren vierseitigen Leseprobe. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

152. Insulcon B.V., Insulcon GmbH und Keramab N.V.: Material Safety Datasheet, E-Glass Fibre Textiles, Formblatt MSDS, gültig ab 3. April 2014, ersetzt die Fassung vom 27. April 2011; Abschnitt 3. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

153. Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Gladbeck: Produkt- und Verwendungsinformation Steinwolle mit hohem Aluminiumoxid- und niedrigem Silikatanteil, 30. Mai 2017, Anmerkungen I und II und Abschnitt 3; sowie Knauf Insulation: Safety Data Sheet Rock Mineral Wool with ECOSE Technology, KI_DP_201, Revision 6.0 vom 1. September 2023, Abschnitte 3 und 16. Beide geben die Stoffdefinition des Anhangs VI Index 650-016-00-2 wieder. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

154. Morgan Advanced Materials, U.K. Thermal Ceramics Limited: Safety Data Sheet 448, Superwool HT NexGen Castingtip, Revision 1. Juni 2025, und Safety Data Sheet 204, Aluboard 607 und weitere, Revision 30. April 2024, jeweils Abschnitt 3 mit der Stoffdefinition der Erdalkalisilikatwolle; Product Data Sheet BL.01, Superwool Plus Blanket, 18. April 2025, und Product Data Sheet SH.30, Superwool Plus Board, 1. Januar 2025, jeweils Abschnitt Chemical Analysis. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

155. Alkegen, vormals Unifrax: Produktdatenblätter Insulfrax 1300 HT Blanket, Form A-5276, Stand 02/2024; Insulfrax LT Blanket, Form A-5182 Revision 2, Stand 07/2024; Isofrax 1260C Fiber, Form A-5296, Stand 07/2024; jeweils Abschnitt Typical Chemical Analysis. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

156. Morgan Advanced Materials, U.K. Thermal Ceramics Limited: Safety Data Sheets 203 (Cerafiber, Ceraform, Kaowool und weitere), 401 (Cerapaper, Kaowool Papiere und Filze) und 111 (1260 SD Felt, Cera-Pack, Kaoclad, Moist Felt), jeweils Revision 1. Juni 2025, Abschnitt 3 mit der Zusammensetzung der Aluminiumsilikatwolle und den Bindemittelanteilen. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

157. Europäische Chemikalienagentur, Ausschuss der Mitgliedstaaten: Support Document for Identification of Zirconia Aluminosilicate Refractory Ceramic Fibres as a Substance of Very High Concern, angenommen am 9. Dezember 2011; Zusammensetzungsbedingung zum Eintrag mit der Indexnummer 650-017-00-8 in Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

158. Promat: Technical Data Sheet PROMINA, Stand 2017-09, Abschnitt Chemical analysis. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

159. Johns Manville: Safety Data Sheet Calcium Silicate Pipe, Block and Board Insulation, Handelsnamen HP Block Insulation, Thermo-12 Gold und Thermo-1200, Version 2.2, Revision 17. Juni 2019, Abschnitt 3. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

160. Imerys: Datenblatt Harborlite AquaPerl, Juli 2019, Abschnitt Chemical Analysis. Zur Abgrenzung geprüft: Johns Manville, Industrial Insulation Data Sheet IND-200, Sproule WR-1200 Perlite Pipe and Block Insulation, Stand 10. April 2025, ohne Oxidanalyse. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

161. Palabora Copper (Pty) Limited: Vermiculite specifications, Typical Ranges for Major Components und Typical Ranges for Minor Components. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

162. Aspen Aerogels, Inc., Northborough, Massachusetts: Safety Data Sheet Pyrogel XTE, Stand 21. Dezember 2023, Abschnitt 3. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

163. PyroShield: Safety Data Sheet PS-HB-32, PS-1400, PS-1400-V, PS-3600, PS-1800 Silica Fabrics und Silica Needled Mat, Stand 22. März 2023, Abschnitt 2. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

164. Kamenny Vek LLC, Dubna: Safety Data Sheet Continuous basalt fiber products, Marke Basfiber, Revision 2 vom 25. Oktober 2017, Abschnitt 3. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

165. WEICON GmbH & Co. KG, Münster: Safety Data Sheet Anti-Seize High-Tech Assembly Paste, Produktnummer 261000, Version 1.03 vom 16. Dezember 2022, Abschnitt 3; sowie Univar Solutions UK Ltd.: Safety Data Sheet Molykote P 37 Antiseize Paste, Produktnummer 60535, Version 1.000 vom 14. August 2022, Abschnitte 2.2 und 3. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

166. Internationale Seeschifffahrts-Organisation: MSC.1/Circ.1321, Guidelines for measures to prevent fires in engine-rooms and cargo pump-rooms, veröffentlicht 18. November 2009; Abschnitte 3.3, 3.4, 5.1.1, 5.1.3, 5.2 und 5.3 sowie Teil 2 Kapitel 2 Abschnitte 1.1.2 bis 1.1.5. Amtlicher Nachdruck desselben Wortlauts: Maritime and Coastguard Agency, Vereinigtes Königreich, Marine Information Note 579 (M). Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

167. tmax Group, vormals Thermamax: Anwendungsseiten Marine, Schienenfahrzeuge, Isolierungen für Baumaschinen, Power Generation und Automotive sowie die Beschreibungen Metallische Isolierverkleidung, Textile Isolierungen und Abgasnachbehandlung; dazu der Produktkatalog Tmax-DryTec zur Unterbodendämmung um Partikelfilter- und SCR-Module. Ohne Veröffentlichungsdatum auf den Seiten. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

168. MAN Energy Solutions: MAN L32/44 GenSet IMO Tier III, Project Guide Marine, Fassung 2.1 vom 21. Oktober 2021, Abschnitte 2.17, 5.9.2 und 5.10; sowie Everllence, vormals MAN Energy Solutions: ME Engine description, Dokument 199 05 61-7.4, Stand 23. Juni 2025. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

169. Wärtsilä Finland Oy: Wärtsilä 46F Product Guide, Dokument DAAB605814, Ausgabe 1/2020 vom 12. Februar 2020, Abschnitte 5.5, 11.3.1 und 11.3.2. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

170. InsulTech, LLC: Locomotive Insulation Solutions, Seitenstand 11. Juli 2024, mit den Angaben zu Dämmstoffarten, Heißseitenwerkstoffen und Einsatztemperaturen; sowie die Produktseite T1000, 2000, Custom Removable Insulation Blankets, Seitenstand 3. Juni 2024. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

171. Reference Datasheet TCG 2020 V16 zum Gasmotor MWM TCG 2020 V16, erstellt am 9. Juli 2024 von einem Anlagenbauer; Abgastemperaturen bei 100, 75 und 50 Prozent Last. Eine Originalfassung des Motorenherstellers war nicht abrufbar. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

172. Johns Manville: Industrial Insulation Technical Bulletin IND-TB014, Diesel Generator Exhaust Insulation Selection, erstellt 23. Oktober 2020; Angaben zu Abgastemperatur, zweilagiger Verlegung, Blechmantel und Befestigung aus Edelstahl 304 sowie zum Ausbrand des organischen Bindemittels der Mineralwolle ab etwa 177 °C nach ASTM C447 Abschnitt 5.7.2. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

173. Morgan Advanced Materials, Thermal Ceramics: HRSG Industry Brochure, Dateikennung vom 11. November 2016; Produktzuordnung je Bauteil für Kamin, Schalldämpfer, Rauchgaskanal, Zusatzbrenner, Boden und Gehäuse sowie die Temperatur- und Gasgeschwindigkeitsangaben des Abhitzekessels. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

174. Olson, Scott; Morales, Kevin: Combustion Turbine Exhaust Ducts, Turbomachinery Magazine, 8. Juni 2017; Angaben zu Linerblechen aus 304er und 409er Stahl, Bolzen aus 304, Dämmdicke und Temperaturwechsel beim Anfahren. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

175. ElringKlinger AG: Fact Sheet ElroShield M, Thermal and acoustic management for the entire vehicle, Shielding systems by ElringKlinger; Angaben zu Trägerlagenwerkstoff, Dämmeinlage und Arbeitstemperatur. Ohne Datum im Dokument. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

176. 3M: Technical Data Sheets 3M Interam Mat Mount 1600HTE, Februar 2022, und 3M Interam Mat Mount 1650HTG, Juli 2025; Lagerungsmatten für Katalysator, Dieselpartikelfilter und Endkonusdämmung mit Einsatztemperaturen bis 1.100 °C. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

177. Aperam: Stainless Steel, The Material of Choice for Manifolds and Catalytic Converters, Stand 2020; sowie Produktdatenblatt KARA Ferritic Stainless Steel K41X, FT_K41X_en_web, mit 17,80 Prozent Chrom und Oxidationsbeständigkeit bis 950 °C. Zur Untergrenze nichtrostender Stähle: British Stainless Steel Association nach EN 10088-1, mindestens 10,5 Prozent Chrom. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

178. Rockwool Technical Insulation: Product Data Sheet ProRox WM 950ES, Ausgabe 17. Juli 2026, und ProRox WM 970 sowie die Broschüre How to prevent corrosion, Industrial Insulation, Abschnitt 4 mit der Anwendungsbeschreibung für Kesselwände, Öfen, Rauchgaskanäle und Rohrleitungen und den Angaben zu Rohrschalen bis 650 °C. Abruf 17. Oktober 2026. Quelle

179. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, Deutschland) vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 17. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 337); § 2 Absatz 1 Nummer 3 und 4, § 2 Absatz 5, § 6 Absatz 1, 3, 5, 8, 11 und 12, § 7 Absatz 3, 4 und 5 sowie § 10 und § 14. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

180. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, Deutschland), § 5a Besondere Mitwirkungs- und Informationspflichten für Veranlasser von Tätigkeiten an baulichen oder technischen Anlagen und § 6 Absatz 2a bis 2c; § 5a und § 6 Absatz 2a bis 2c eingefügt durch Artikel 1 Nummer 6 und 7 der Verordnung vom 2. Dezember 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 384), in Kraft seit dem 5. Dezember 2024. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

181. Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, Deutschland), § 10a Expositionsverzeichnis, § 11a Absatz 3, 4 und 4a (Asbest) sowie § 19 Absatz 3 bis 6; § 10a eingefügt durch Artikel 1 Nummer 11 der Verordnung vom 2. Dezember 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 384), zugleich Aufhebung des bisherigen § 14 Absatz 3 und 4; § 11a Absatz 4a eingefügt durch die Verordnung vom 17. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 337), in Kraft seit dem 20. Dezember 2025. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

182. Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 410, Expositionsverzeichnis bei Gefährdung gegenüber krebserzeugenden, keimzellmutagenen oder reproduktionstoxischen Gefahrstoffen der Kategorien 1A oder 1B (Deutschland); Ausgabe September 2026, GMBl 2026 S. 528-532 vom 25. September 2026 [Nr. 23], Fassung 25. September 2026; Abschnitt 3 Absatz 2, 5, 7 und 8, Abschnitt 4 Absatz 1 Nummer 3, 5, 7 und 10, Absatz 3, 4 und 7 sowie Abschnitt 5 Absatz 1. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

183. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Zentrale Expositionsdatenbank ZED, Portalseite; Angaben zur Übertragung der Aushändigungs- und Archivierungspflicht und zur Aufbewahrung von mindestens 40 Jahren nach Ende der Exposition. Ein Stand ist auf der Seite nicht angegeben. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

184. Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV, Deutschland) vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 11. Mai 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 136); § 4 Absatz 1 und 2, § 5 Absatz 1 sowie Anhang Teil 1 Absatz 1 Nummer 1 (Chrom-VI-Verbindungen) und Nummer 2 Buchstabe i (Hochtemperaturwollen) und Absatz 2 Nummer 1. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

185. Berufskrankheiten-Verordnung (BKV, Deutschland) vom 31. Oktober 1997 (BGBl. I S. 2623), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juli 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 210); Anlage 1 Nummer 1103 „Erkrankungen durch Chrom oder seine Verbindungen". Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

186. Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG, Deutschland) vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 22. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 369); § 21 Absatz 1, 1a und 2, § 22 Absatz 2 und 3, § 25 Absatz 1 und 2 sowie § 26. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

187. Siebtes Buch Sozialgesetzbuch (SGB VII, Deutschland), § 17 Absatz 1 Überwachung und Beratung sowie § 19 Absatz 1 und Absatz 2 Nummer 5 und 6 Befugnisse der Aufsichtspersonen. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

188. Chemikaliengesetz (ChemG, Deutschland) in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3498, 3991), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 29. März 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 86); § 26 Absatz 1 Nummer 8 Buchstabe b und Absatz 3 sowie § 27 Absatz 2 bis 4. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

189. Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV, Deutschland) vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I S. 1533); § 2 Absatz 2, § 3 Absatz 1 und 2, Anlage Einleitung Nummer 2.2.1 sowie die Abfallschlüssel 16 09 02*, 16 11 03*, 16 11 04, 16 11 05*, 16 11 06, 17 06 03* und 17 06 04. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

190. Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, Deutschland) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 17 des Gesetzes vom 22. Juli 2026 (BGBl. 2026 I Nr. 224); § 9a Absatz 1 bis 3 Vermischungsverbot und Behandlung gefährlicher Abfälle. § 9a ist von den Änderungen des Jahres 2026 nicht berührt. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

191. Berufsgenossenschaft Verkehrswirtschaft Post-Logistik Telekommunikation (BG Verkehr, Deutschland): Mögliche Chrom(VI)-Exposition; Voraussetzungen der Bildung, betroffene Tätigkeiten sowie Hinweis auf eigene Untersuchungen zu Schiffsmaschinenräumen und Automotoren. Letzte Aktualisierung 08/2026. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

192. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU, Deutschland): Chrom(VI)-Verbindungen an Edelstahl; Unterscheidung nach dem Vorhandensein alkali- und erdalkalimetallhaltiger Wärmedämmstoffe sowie Hinweis auf die Federführung der BG ETEM. Ein Stand ist auf der Seite nicht angegeben. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

193. Richtlinie 2004/37/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Exposition gegenüber Karzinogenen, Mutagenen oder reproduktionstoxischen Stoffen bei der Arbeit, konsolidierte Fassung 02004L0037 — DE — 08.04.2024 — 007.003; Artikel 1 Absatz 3 und 4, Artikel 2 Buchstabe a und c, Artikel 3 Absatz 1, Artikel 4 Absatz 1, Artikel 5 Absatz 1 bis 5, Artikel 6, Artikel 10, Artikel 11, Artikel 12 Buchstabe c, Artikel 14 Absatz 1, 4 und 8, Artikel 15 Absatz 1 und 2 sowie Anhang I und Anhang III Teil A. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

194. Richtlinie 89/391/EWG über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit, konsolidierte Fassung 1989L0391 — DE — 11.12.2008 — 003.001; Artikel 6 Absatz 1 bis 3 und 5 sowie Artikel 9 Absatz 1 und 2. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

195. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), konsolidierte Fassung 02006R1907 — DE — 22.06.2026 — 069.001; Artikel 55 und 56 Absatz 1 sowie Anhang XIV Einträge 10 bis 12, 16 bis 22 und 28 bis 31 (Chrom(VI)-Stoffe) mit den Spalten Antragsschluss und Ablauftermin. Calciumchromat ist in Anhang XIV nicht enthalten. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

196. Europäische Chemikalienagentur (ECHA): Pressemitteilung ECHA/NR/25/11 vom 29. April 2025, ECHA proposes restrictions on chromium(VI) substances to protect health; Umfang des Vorschlags, die sechs ausgenommenen Verwendungskategorien, Einbeziehung von Bariumchromat und Beginn der sechsmonatigen Konsultation am 18. Juni 2025. Der Verfahrensstand im Oktober 2026 ist nicht belegt. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

197. Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, konsolidierte Fassung 02008L0098 — DE — 16.10.2025 — 005.001; Artikel 7 Absatz 1, 2 und 4 sowie Artikel 18 Absatz 1 und 2. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

198. Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis, konsolidierte Fassung 02000D0532 — DE — 06.12.2023 — 003.001, in der Fassung des Beschlusses 2014/955/EU und des Delegierten Beschlusses (EU) 2023/2581; Anhang Nummer 1 und 2 sowie die Abfallschlüssel 16 09 02*, 16 11 01* bis 16 11 06, 17 06 01*, 17 06 03*, 17 06 04 und 17 06 05*. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

199. Bekanntmachung der Kommission, Technischer Leitfaden zur Abfalleinstufung, 2018/C 124/01, ABl. C 124 vom 9. April 2018, S. 1; Begriff der Spiegeleinträge sowie Anhang 4 mit der Norm EN 15192 zur Bestimmung von sechswertigem Chrom in Feststoffen. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

200. Richtlinie 2009/148/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Asbest am Arbeitsplatz, konsolidierte Fassung 02009L0148 — DE — 20.12.2023 — 002.002 in der Fassung der Richtlinie (EU) 2023/2668; Artikel 3 Absatz 1 und 2, Artikel 4 Absatz 2, 3 und 5, Artikel 5 Absatz 1, Artikel 11, Artikel 13, Artikel 14 mit Anhang Ia, Artikel 15 Absatz 1 sowie Artikel 19 Absatz 2 und 3. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

201. Europäische Kommission: Third study on collecting most recent information for a certain number of substances with the view to analyse the health, socio-economic and environmental impacts in connection with possible amendments of Directive 2004/37/EC, Final Report vom 8. Februar 2018, Referenz VC/2017/0011, ISBN 978-92-76-07993-4, doi:10.2767/042168; Teilbericht Chromium(VI) in fumes from welding, plasma cutting and similar processes. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

202. Arbeidsomstandighedenwet (Niederlande), BWBR0010346, geltende Fassung ab 1. Juli 2026; Artikel 3 Absatz 1 und 4, Artikel 5 Absatz 1, 3 und 4, Artikel 8 Absatz 1 und 4, Artikel 24 Absatz 1, Artikel 27, Artikel 28 und Artikel 28a. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

203. Arbeidsomstandighedenbesluit (Niederlande), BWBR0008498, geltende Fassung ab 1. August 2026; Artikel 1.1 Absatz 5 Buchstabe b, Artikel 4.1c, Artikel 4.2 Absatz 7, 8 und 9, Artikel 4.10c Absatz 4 und 5, Artikel 4.11 bis 4.13, Artikel 4.15, Artikel 4.16, Artikel 4.18 bis 4.21, Artikel 9.9b Absatz 1 Buchstabe d, Artikel 9.10a Absatz 1 bis 3 und Artikel 9.22. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

204. Arbeidsomstandighedenregeling (Niederlande), BWBR0008587, geltende Fassung ab 27. August 2026; Artikel 4.19 und 4.20 sowie Bijlage XIII Onderdeel A und B2 mit dem Eintrag „Chroom (VI)-verbindingen (als Cr)" und der zugehörigen Erläuterung, dazu Artikel 4.20c (national bestimmte krebserzeugende Verfahren). Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

205. Regeling van de Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid vom 18. Oktober 2016, 2016-0000222216, tot wijziging van de Arbeidsomstandighedenregeling in verband de wijziging van twee wettelijke grenswaarden in Bijlage XIII (Bisfenol A en Chroom (VI)-verbindingen), Staatscourant 2016, 57792, ausgegeben am 2. November 2016, in Kraft seit dem 1. März 2017; Artikel I Buchstabe B und Artikel II sowie die Toelichting zu Artikel I Buchstabe B. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

206. Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (Niederlande): HERDRUK SZW-lijst met kankerverwekkende stoffen en processen, mutagene of voor de voortplanting giftige stoffen, Staatscourant 2026, 23121, Heruitgave vom 9. Juli 2026; Teil 1 A Liste der krebserzeugenden Verfahren mit zehn Positionen, Teil 1 B mit den Einträgen zu Chrom(VI)-Verbindungen einschließlich Calciumchromat und Natriumchromat sowie Teil 2 und Teil 3. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

207. Beleidsregel boeteoplegging arbeidsomstandighedenwetgeving (Niederlande), BWBR0032326, geltende Fassung ab 11. Februar 2025; Artikel 1 Absatz 1, 3, 8, 10, 11 und 12 sowie die Tarieflijst, Onderdeel Arbobesluit, mit den Zeilen zu den Artikeln 4.1b, 4.1c, 4.2, 4.13, 4.15 bis 4.20 und den Fußnoten 60, 61 und 77. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

208. Arbeidsomstandighedenbesluit (Niederlande), BWBR0008498, geltende Fassung ab 1. August 2026, Hoofdstuk 4 Afdeling 5 Asbest; Artikel 4.46, Artikel 4.47 Absatz 7 und 8, Artikel 4.47c Absatz 1 und 2, Artikel 4.51a Absatz 1 bis 3, Artikel 4.54a Absatz 3 bis 7 und Artikel 4.54d, dazu Arbeidsomstandighedenregeling Artikel 4.26 und 4.27 zu den Zertifizierungsschemata. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

209. Regeling Europese afvalstoffenlijst (Eural, Niederlande), BWBR0013546, geltende Fassung ab 1. Januar 2024; Artikel 1, 2 und 4 Absatz 1 bis 3. Niederländische Bezeichnungen der Abfallschlüssel nach der Handreiking EURAL, Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Fassung vom 31. August 2019. Die umgekehrte Beweislast nach der amtlichen Erläuterung des Informatiepunt Leefomgeving. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

210. Wet milieubeheer (Niederlande), BWBR0003245, geltende Fassung ab 1. August 2026; Artikel 10.38 Absatz 1 und 2, Artikel 10.39 Absatz 1, Artikel 10.40 Absatz 2 und Artikel 10.54 Absatz 1. Artikel 10.54a ist zum 1. Januar 2024 entfallen; das betriebliche Mischen gefährlicher Abfälle ist seither nach Artikel 3.196 des Besluit activiteiten leefomgeving genehmigungspflichtig. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

211. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Niederlande): Chroom-6 op de POMS-locaties van Defensie: gezondheidseffecten en verantwoordelijkheden, RIVM-rapport 2018-0061, 2018, sowie Onderzoek naar blootstelling aan chroom-6 en arbeidsomstandigheden op Defensielocaties, periode 1970-2015, RIVM-rapport 2021-0066, 2021; Auftraggeber Paritaire Commissie Chroom-6, Fragestellung zu chroom-6-houdende verf of verfstof. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

212. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Niederlande): Onderzoek naar chroom-6 bij NS/NedTrain in de periode 1970 t/m 2020, RIVM-rapport 2022-0152, 2022; Publiekssamenvatting zu alten Farbschichten und zu Schleif- und Schweißarbeiten. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

213. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Niederlande): Chroom-6 bij het re-integratieproject tROM, RIVM-rapport 2018-0164, veröffentlicht im Januar 2019; Restaurierungsarbeiten an Museumszügen in Tilburg und die Feststellung zur Risiko-Inventarisierung von 2005. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

214. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM, Niederlande): Inventarisatie van toepassingen van chroom-6 op de werkplek, RIVM-briefrapport 2020-0080, 2020; Abschnitt 4.2.1 zu feuerfesten Auskleidungen, Übersichtstabelle in Abschnitt 5.2 und Zusammenfassung mit dem Hinweis „hier is echter geen informatie over verkregen". Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

215. Regeling uitkering chroom-6 Defensie (Niederlande), BWBR0040982, geltende Fassung ab 8. Juni 2021; Bijlage 2 Buchstabe b mit der abschließenden Aufzählung der bewertungsrelevanten Tätigkeiten. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

216. Arboportaal des Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (Niederlande): Wat is chroom-6? sowie Factsheet chroom-6, Fassung vom 9. Juni 2020, veröffentlicht am 14. Juli 2020, und Beheersregime chroom-6 en andere gevaarlijke stoffen, Versie 2.0 vom 11. April 2022 mit der Anwendungsbegrenzung in Fußnote 1. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

217. Nederlandse Arbeidsinspectie (Niederlande): Themenseite Chroom-6; genannte Expositionsquellen, Hinweis zur Reichweite des Beheersregime und der Satz „Een negatieve uitslag is echter niet genoeg om te besluiten om géén maatregelen te nemen." Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

218. Beleidsregel arbocatalogi 2019 (Niederlande), BWBR0042288, geltende Fassung ab 21. Juni 2023; Bijlage, Zeile „Installatie- en isolatie" mit den beanspruchten Vorschriften und den genannten Gefahrstoffen Asbest und Quarzstaub. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

219. Health and Safety at Work etc. Act 1974 (c. 37, Vereinigtes Königreich), Fassung „Latest available (revised)"; Section 2 Absatz 1 und 2, Section 3 Absatz 1 und 2, Section 7, Section 21 Improvement notices, Section 22 Prohibition notices, Section 40 Onus of proving limits of what is practicable sowie Section 84 Extent. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

220. The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (SI 2002/2677, Vereinigtes Königreich), Fassung „Latest available (revised)", Geltungsvermerk E+W+S; Regulation 2 Absatz 1 (Begriffe „substance hazardous to health" und „carcinogen"), Regulation 6 Absatz 2 und 4, Regulation 7 Absatz 4, 5, 7 und 9, Regulation 9 Absatz 1 bis 5, Regulation 10 Absatz 1 bis 5, Regulation 11 Absatz 1, 3 und 5, Regulation 12 Absatz 1, 2 und 4 sowie Schedule 1, Schedule 2A, Schedule 4, Schedule 5 und Schedule 6. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

221. Health and Safety Executive (Großbritannien): L5, Control of substances hazardous to health, The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002 (as amended), Approved Code of Practice and guidance, sechste Ausgabe 2013, ISBN 978 0 7176 6582 2; Absätze 57, 69 und 87 sowie die Erläuterungen zu Schedule 5 und Schedule 6. Eine Textsuche nach „insulat" ergibt in diesem Dokument keinen Treffer. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

222. Health and Safety Executive (Großbritannien): EH40/2005 Workplace exposure limits, vierte Ausgabe 2020, ISBN 9780717667031; Vorbemerkung zu den am 17. Januar 2020 in Kraft getretenen Änderungen, Tabelle 1 mit dem Eintrag „Chromium (VI) compounds (as Cr)", 0,01 mg/m³ als Achtstundenmittelwert und 0,025 mg/m³ für prozessbedingt erzeugte Exposition mit Fußnote 1, Anmerkungen Carc, sen und BMGV. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

223. Health and Safety Executive (Großbritannien) als GB CLP Agency: The GB mandatory classification and labelling list, veröffentlicht am 17. Februar 2025, zuletzt aktualisiert am 22. September 2025, Datei mcl-list.xlsx; Einträge 024-008-00-9 Calciumchromat (Carc. 1B, H350), 024-017-00-8 Chromium (VI) compounds (Sammeleintrag, H350i) und 024-018-00-3 Natriumchromat. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

224. Health and Safety Executive (Großbritannien): The GB CLP Regulation; Übernahme der unionsrechtlichen harmonisierten Einstufungen mit dem Wortlaut „all existing EU harmonised classification and labelling in force on 31 December 2020, are assimilated into Great Britain as GB mandatory classification and labelling (GB MCL)" sowie zur Abgrenzung gegenüber Nordirland mit dem Wortlaut „substances and mixtures placed on the market in Northern Ireland are subject to the EU CLP Regulation". Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

225. Health and Safety Executive (Großbritannien): UK REACH Authorisation List (Annex XIV), Datei authorisation-list-annex-xiv.xlsx, mit Natriumchromat unter Eintrag 22; UK REACH Candidate List, Datei candidate-list.xlsx; Restrictions under REACH, Datei list-of-restrictions.xlsx, Version 1 vom 31. März 2021; sowie die Mitteilung Authorisations of hexavalent chromium compounds (CrVI) zum Auslaufen der nach EU-REACH erteilten Zulassungen am 21. September 2024. Calciumchromat ist weder in Annex XIV noch auf der Kandidatenliste enthalten. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

226. The Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations 2013 (SI 2013/1471, Vereinigtes Königreich), Fassung „Latest available (revised)"; Regulation 8 Occupational diseases, Regulation 9 Reportable occupational diseases sowie Schedule 1 Teil 1 Nummer 2 und 3. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

227. The Hazardous Waste (England and Wales) Regulations 2005 (SI 2005/894), Fassung „Latest available (revised)"; Regulation 4 Absatz 1, Regulation 6, Regulation 19, Regulation 20 Absatz 2 sowie Regulation 35 und 36. Die List of Wastes (England) Regulations 2005 (SI 2005/895) sind zum 1. Juli 2015 durch SI 2015/1360 Regulation 10 Buchstabe a aufgehoben; die geltende Verweisung auf die Entscheidung 2000/532/EG „as amended from time to time" steht seither in Regulation 4 Absatz 1. Daneben: The Hazardous Waste (Wales) Regulations 2005 (SI 2005/1806) und die Special Waste Regulations 1996 (SI 1996/972) in der Fassung der Special Waste Amendment (Scotland) Regulations 2004 (SSI 2004/112). Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

228. Environment Agency, Natural Resources Wales, Scottish Environment Protection Agency und Northern Ireland Environment Agency: Waste Classification, Guidance on the classification and assessment of waste, Technical Guidance WM3, erste Ausgabe, Fassung v1.2.GB vom Oktober 2021, LIT 10121; Appendix A mit den Abfallschlüsseln 16 09 02*, 16 11 und 17 06 sowie Appendix C7 Tabelle C7.1 mit der Konzentrationsgrenze von 0,1 Massenprozent für HP 7 bei Carc. 1A und 1B mit H350. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

229. Environmental Protection Act 1990 (c. 43, Vereinigtes Königreich), Section 34 Duty of care etc. as respects waste, Fassung „Latest available (revised)". Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

230. The Health and Safety and Nuclear (Fees) Regulations 2022 (SI 2022/1378, Vereinigtes Königreich), Regulation 23 und Regulation 24, einschließlich Regulation 24 Absatz 1 zur Begrenzung auf die tatsächlich entstandenen angemessenen Kosten und Regulation 24 Absatz 13 zur Freistellung von Arbeiten unter einer Asbestlizenz; dazu Health and Safety Executive: HSE fees and charges, current rates, Stand 1. April 2026, mit einem Satz von 188 Pfund je Stunde für Fee for Intervention. Einen gesetzlich festgelegten Stundensatz gibt es nicht. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

231. Sentencing Council (England und Wales): Health and safety offences, Organisations: Breach of duty of employer towards employees and non-employees, Breach of duty of self-employed to others, Breach of Health and Safety regulations; in Kraft seit dem 1. Februar 2016, zuletzt aktualisiert am 5. Oktober 2026; Schritt 1 und 2 mit der Matrix aus Verschuldensgrad und Schadenskategorie, den Umsatzkategorien und dem Gesamtrahmen von 50 Pfund bis 10 Millionen Pfund. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

232. The Control of Asbestos Regulations 2012 (SI 2012/632, Vereinigtes Königreich), Fassung „Latest available (revised)"; Regulation 6 Absatz 1 Buchstabe b, Regulation 7, Regulation 8 Absatz 1 bis 4, Regulation 9 Absatz 1, Regulation 10 Absatz 1 Buchstabe a Nummer i bis xi, Regulation 19 Absatz 1 und 4, Regulation 20 Absatz 1, 3 und 4 sowie Regulation 21 Absatz 1 und 2. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

233. Health and Safety Executive (Großbritannien): HSG248, Asbestos, The Analysts' Guide, zweite Ausgabe Mai 2021 in der geänderten Fassung vom Juli 2021, ISBN 9780616667079; Tabelle A5.1 mit dem Freigabeverfahren in vier Stufen und dem Kriterium „All air sample results must be <0.010 f/ml for this stage to pass". Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

234. Institute of Occupational Medicine (Vereinigtes Königreich): Protect your workers from the threat of Chromium VI, Merkblatt ohne Datums-, Versions- oder Referenzangabe; Nennung von „calcium containing insulation systems" sowie der Feststellung „Cr VI dust can be commonly found on high-temperature insulated parts such as large engines". Ein Veröffentlichungsdatum ist dem Dokument nicht zu entnehmen. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

235. Energy Institute (Vereinigtes Königreich): Toolbox, Exposure hazard, hexavalent chromium; Beschreibung der Bildung an Edelstahl im Kontakt mit calciumoxidhaltigen Materialien wie Gewindedichtmitteln oder Dämmung und der Zunahme bei erhöhten Temperaturen. Das Material ist nach Angabe der Seite von Energy Safety Canada übernommen, Seitenangabe 3. Mai 2023. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

236. Thermal Insulation Contractors Association (Vereinigtes Königreich): TICA Technical Resources, Übersicht der technischen Unterlagen; durchgesehen am 17. Oktober 2026, ohne Unterlage zu Chrom(VI) oder Chromaten. Quelle

237. UK Asbestos Training Association: OH02 Syllabus, Chromium VI Awareness (Hexavalent Chromium); genannte Vorkommen Schweißen, Galvanik, Pigment- und Farbherstellung, Gießerei, Bau und Abbruch bei chromhaltigen Beschichtungen sowie Beschichtungsentfernung. Dämmung, Heißteile und Turbinen sind nicht genannt. Abgerufen am 17. Oktober 2026. Quelle

238. Nordirland und Schottland: The Control of Substances Hazardous to Health Regulations (Northern Ireland) 2003 (SR 2003/34), The Control of Asbestos Regulations (Northern Ireland) 2012 (SR 2012/179), The Reporting of Injuries, Diseases and Dangerous Occurrences Regulations (Northern Ireland) 1997 (SR 1997/455), The Health and Safety at Work (Northern Ireland) Order 1978 (SI 1978/1039 (NI 9)) und The Hazardous Waste Regulations (Northern Ireland) 2005 (SR 2005/300). Abgerufen am 17. 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.
1.3	Oktober 2026	Abschnitt 26 (Neutralisierung) vertieft: Begriffsklärung, die Arbeitsanweisung von Vattenfall Generation NL, die Konferenzbefunde vom 6. November 2025 zu Ecopoint und Econtras einschließlich des SEEF-Zertifikats, die Formulierung der deutschen Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft und der Vergleich mit der Chromatreduktion im Zement; Abschnitt 28 um die Betriebsrealität und die Materialwahl ergänzt; fünf neue Quellen.
1.4	Oktober 2026	Abschnitt 25 um einen Unterabschnitt zu den Pflichten vor Arbeitsbeginn erweitert (Erkundung, Gefährdungsbeurteilung und Beginnverbot nach deutschem, niederländischem, britischem und US-amerikanischem Recht); Abschnitt 26 um die Gegenüberstellung der Betriebsanweisung der deutschen Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft mit deren öffentlicher Informationsseite und um die Wortgleichheit mit der Produktseite des Anbieters ergänzt; acht neue Quellen.
1.5	Oktober 2026	Neuer Abschnitt 27 „Chrom(III): der angenommene Endzustand" mit der Argumentationsfigur der Herstellerunterlagen, den Reaktionsstufen nach der MAK-Begründung, der fehlenden Speziesbestimmung, den Einstufungen nach der MAK- und BAT-Werte-Liste 2026 und der Anses-Stellungnahme von 2021, dem Präzedenzfall Leder, der Folgerung auf abflussfreies Arbeiten und der Rückkehr des offenen Chrom(III) an das Heißteil; Abschnitt 26 um den Anbieter MATinspired und den Prüfkreis um das Testkit TK11 ergänzt; die folgenden Abschnitte um eine Nummer verschoben; fünf neue Quellen.
1.6	Oktober 2026	Neuer Abschnitt 31 „Zur Auswahl des zitierten Regelwerks" mit dem Verhältnis der deutschen TRGS 561 zur Richtlinie 2004/37/EG, den vier Beurteilungsebenen und dem Handbefund der französischen Feldstudie einschließlich Luft-, Urin- und Fasermessungen; neuer Abschnitt 32 „Größenordnung: ein Gedankenversuch" mit Bestandszahlen aus öffentlichen Herstellerangaben, Flottenstatistiken und Anlagenregistern sowie einer Hochrechnung der jährlichen Anlässe; die Schlussfolgerung um zwei Nummern verschoben; sechzehn neue Quellen.
1.7	Oktober 2026	Neuer Anhang „Dämmstoffe mit basischen Oxiden und ihre Einsatzorte" vor der Schlussfolgerung, mit zwei Tabellen: handelsübliche Dämmstoffe mit belegtem Gehalt an Calcium-, Natrium- und weiteren basischen Oxiden und die Anwendungsfelder, in denen diese Dämmstoffe an chromlegierten Heißteilen verbaut sind, von Yachten, Container- und Kreuzfahrtschiffen über Lokomotiven, Baumaschinen und Fahrzeuge bis zu Blockheizkraftwerken, Netzersatzanlagen, Turbinen, Öfen und Chemieanlagen; Schlussfolgerung um eine Nummer verschoben; achtundzwanzig neue Quellen.

Version	Datum	Änderung
1.8	Oktober 2026	Drei neue Kapitel vor dem Anhang: die Pflichtenlage in Deutschland (Gefahrstoff- und Tätigkeitsbegriff, Erkundung vor Arbeitsbeginn und Veranlasserpflicht nach § 5a, Substitution und Rangfolge, der Wert von 1 µg/m³, Expositionsverzeichnis nach § 10a und TRGS 410, arbeitsmedizinische Vorsorge und Berufskrankheit, Aufsicht und Sanktionen, Abfallrecht und der Abstand zum Asbestregime), die Pflichtenlage in der Europäischen Union (Richtlinie 2004/37/EG, Rahmenrichtlinie 89/391/EWG, verbindlicher Grenzwert, Verzeichnis und vierzig Jahre, Einstufung, Zulassung und der Beschränkungsvorschlag von 2025, Abfallrecht der Union und der Abstand zur Asbestrichtlinie) und die Pflichtenlage in den Niederlanden (Arbeidsomstandighedenbesluit, Grenzwert 0,001 mg/m³, die eigene Grenzwertfestlegung nach Artikel 4.16 Absatz 2, Liste und vierzig Jahre, Bußgeldrahmen und Wirtschaftsdelikt, Eural und der niederländische Chroom-6-Komplex); Anhang und Schlussfolgerung um drei Nummern verschoben; vierzig neue Quellen.
1.9	Oktober 2026	Ein neues Kapitel vor dem Anhang: die Pflichtenlage im Vereinigten Königreich (Stoffbegriff der COSHH Regulations 2002 unabhängig von der Einstufung, Beurteilung und Instandhaltung mit Aufzeichnung erst ab fünf Beschäftigten, Verhinderung, Ersatz und Minimierung nach Regulation 7 mit der Beweislast nach Section 40, der Grenzwert 0,01 mg/m³ nach EH40 vierte Ausgabe 2020 und der überholte Wert im Merkblatt der Behörde, Messung, Gesundheitsüberwachung und vierzig Jahre, Unterweisung auch der Beschäftigten anderer Unternehmen, Aufsicht, Straftat, Kostenerstattung und Meldepflicht, Abfallrecht nach den Hazardous Waste Regulations und WM3, GB CLP und UK REACH, der Abstand zum Asbestregime sowie die Benennung des Sachverhalts durch Energy UK im September 2019); Anhang und Schlussfolgerung um eine weitere Nummer verschoben; neunzehn neue Quellen.
1.10	Oktober 2026	Berichtigung und Vertiefung zum britischen Regelwerk. Die Zeile Vereinigtes Königreich in Abschnitt 18, der zugehörige Satz in der Kurzfassung und im Überblick stehen nun auf 0,01 mg/m³ im Achtstundenmittel und 0,025 mg/m³ für prozessbedingt erzeugte Exposition nach EH40/2005, vierter Ausgabe 2020; der bisher genannte Wert von 0,05 mg/m³ stammt aus dem Merkblatt INDG346, das die Behörde nach der Absenkung zum 17. Januar 2020 nicht nachgezogen hat, und ist als solcher kenntlich gemacht. Im Kapitel zum Vereinigten Königreich neu: die Und-Verknüpfung der drei Bedingungen der Regulation 7(7) mit dem Vergleich zu Artikel 5 Absatz 3 der Richtlinie 2004/37/EG und zu § 10 Absatz 1 der Gefahrstoffverordnung, der Befund, dass EH40 für Chrom(VI) keine Hautkennzeichnung führt und die Anmerkung „sen" dort nur Atemwegssensibilisierung meint, sowie ein Unterabschnitt zu den Gefahrenhinweisen mit den drei Einträgen der GB mandatory classification and labelling list und der Feststellung, dass H317 und H314 in Regulation 7(7) Buchstabe c nicht genannt sind. Das Zitat zu Artikel 5 Absatz 3 im Kapitel zur Europäischen Union ist auf den Reduktionsmaßstab begrenzt. Eine neue Quelle.