Chromate am Arbeitsplatz

Weitere Beobachtungen zur Chrom(VI)-Entstehung durch die Verwendung alkali- und/oder erdalkalimetallhaltiger Isolationsmaterialien an chromhaltigen Metallheißteilen an Motoren und Turbinen

weitere Beobachtungen zu Chromaten am Arbeitsplatz

von Lloyd Hopes, Markus Sommer und Florian Sommer

31. Januar 2025

Version 1.1 · November 2026

Zusammenfassung

Die vorliegende Sammlung ist als Ergänzung zur im Deckblatt angegebenen Feldstudie zu sehen und soll aufzeigen, dass die in den Studien

Feldstudie Chromate am Arbeitsplatz

Feldbeobachtung FB01: Isolationskassetten

Feldbeobachtung FB02: Handhabung und Lagerung

beschriebene Präsenz krebserregender und chronisch umweltschädlicher Chrom(VI)-Verbindungen (Chromate), insbesondere Calciumchromat und die damit verbundene Staubentstehung und (Hintergrund-) -belastung (inhalative, einatembare Fraktion) kein Einzelfall ist.

Die Autoren beobachten das Vorhandensein der Chromate seit einigen Jahren und haben ihre Erfahrungen vom ersten Moment an fotografisch und textlich dokumentiert, allerdings waren die Nachweismethoden anfänglich beschränkt.

Zum einen wurde ihnen teilweise der Zugang verwehrt, die Analyse erschwert und zum anderen waren die Testmöglichkeiten lediglich durch Schnelltests möglich.

Erst durch die Anschaffung des mobilen Cr(VI) Testkits TK01 (Hersteller: SEEF B.V., NL) konnten positive Schnelltests wissenschaftlich tiefer verifiziert werden.

Mit Inanspruchnahme der Laboranalysen mit Analysebericht durch SEEF B.V. kann nun auch die tatsächliche Chrom(VI)-Staubbelastung in belastbaren Zahlen und chemischen Analysen bestimmt werden.

Im Dezember 2024 wurde die Filterpumpe SG 10-2 der deutschen Firma GSA mbH angeschafft und es konnten erstmals Luftmessungen nach „Von den Unfallversicherungsträgern anerkanntem Messverfahren zur Feststellung der Konzentrationen krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe in der Luft in Arbeitsbereichen“ durchgeführt werden („Verfahren zur Bestimmung von sechswertigem Chrom“ der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV); Information 231-505).

Die Messergebnisse wurden als Hintergrundkonzentration in der Feldstudie ermittelt, die Feldbeobachtung FB02 untersuchte das inhalative Risiko für Chrom(VI)-Verbindungen bei bloßer Handhabung/Lagerung kontaminierter Isolationselemente.

In beiden Untersuchungen wurden mit einem Standardverfahren Chrom(VI)-Konzentrationen bestimmt, die als Mindestwerte anzusehen sind; bei der Handhabung/Lagerung lag bereits der Mindestwert über dem Beurteilungsmaßstab von 0,001 mg/m³.

Die Luftprobe wurde von der GSA Schadstoffanalyse mbH nach einem Standardverfahren ausgewertet. Eine Wiederfindung dieses Verfahrens an calciumhaltigem Dämmstoffstaub ist nicht bestimmt. Für Standardverfahren an calciumhaltigen Dämmstoffen gibt SEEF B.V. Unterbefunde von 20 bis 30 Prozent in milden Fällen bis über 90 Prozent an; das von SEEF B.V. für diese Matrix entwickelte Verfahren erreicht nach denselben Angaben Wiederfindungen von über 80 Prozent. Die gemessenen Luftkonzentrationen sind deshalb als Mindestwerte zu verstehen. Die Staubproben der Gesamtstaubanalyse wurden im Labor von SEEF B.V. analysiert. (Quelle: SEEF B.V., Kennisbank, seefbv.com, Abruf November 2026)

In der konservativen Betrachtung der Hauptstaubentstehung im Belastungskorridor bei Deinstallationsarbeiten lag die abgeleitet Beladung des Atembereichs fast 700% über dem Toleranzwert, welcher in Deutschland in der TRGS

910 festgelegt ist.

Weitere Messungen stehen an, es werden aber eher noch höhere Messwerte erwartet, da die Anzahl abnehmbarer Isolationselemente in der Feldstudie äusserst gering und die Chrom(VI)-Belastung der kontaminierten Elemente, die lediglich gestapelt und manipuliert wurden, eher moderat war.

Diese Ausarbeitung zeigt den Extrakt aus einer langjährigen Nachforschung auf Bildern mit Hinweisen auf das verwendete Isolationsmaterial und den Einsatzort bzw. die Bezeichnung der wärmegedämmten Apparatur.

Der Inhalt der Kapitel 1-11 aus den oben angegebenen Feldstudie und Feldbeobachtungen bleibt unberührt und trifft auf alle nachfolgend gemachten Beobachtungen zu.

Die untersuchten Energieerzeuger bilden oft das „Herzstück" grosser Kraftwerke mit allen Zu- und Ableitungen, aber auch Blockheizkraftwerke bzw. Anlagen der so genannten „Kraft-Wärme-Kopplung" (KWK) im Dauer- oder Flexbetrieb, sowie Notstrom- und Antriebsaggregate in öffentlichen Gebäuden wie

- Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen
- Bädern und anderen Erholungsbetrieben
- Wohnblöcke mit dezentraler Energieversorgung und

Antriebsmotoren für die

- Schiffahrt, im
- Eisenbahnverkehr und zum Teil auch
- Straßenverkehr an Fahrzeugen mit Abgasnachbehandlungssysteme neuester Abgasstufen

sind oder werden Bestandteil der Untersuchungen.

Die Seiten 3 und 4 zeigen die verschiedenen Materialklassen der alkali- und/oder erdalkalimetalloxidhaltigen Dämmstoffe, die anteilig und je nach Einsatzort und baulichen Gegebenheiten mehr als 90% des heutigen Dämmstoffmarktes ausmachen, unterstützt durch ebenfalls branchenrepräsentativ zwei Warnmeldungen von Herstellern der unterschiedlichen Materialklassen.

Den Seiten 5 und 6 betrachten chromat-kontaminierte Anwendungsbeispiele an Motoren und Turbinen namhafter Hersteller, ebenfalls ergänzt durch zwei Warnmeldungen selektiver Anbieter.

Isolationsmaterialien:



Abb.1 Mineralwolle



Abb.2 Mineralwolle



Abb. 3 Mineralwolle



Abb. 4 Glasgewebe



Abb.5 Glasgewebe



Abb. 6 Glasgewebe



Abb. 7 Glasfasernadelmatten



Abb.8 Glasfasernadelmatten

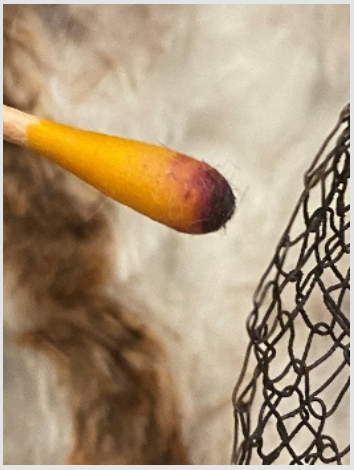


Abb. 9 Glasfasernadelmatten



Abb.10 Microtherm-Produkte



Abb.11 Microtherm-Produkte

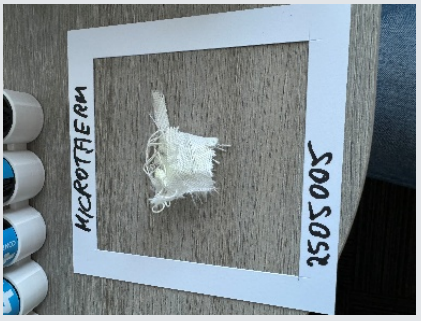


Abb.12 Microtherm-Produkte



Abb.13 Superwool/AES



Abb.14 Superwool AES



Abb.15 Superwool/AES

Die Abbildungen 1-15 zeigen die gängigsten Isolationsmaterialien, die innerhalb der letzten ca. fünf Jahre durchgehend positiv auf Chrom(VI)-Verbindungen getestet wurden, wenn sie eine gewisse Zeit im Einsatz waren und direkten Kontakt mit dem chromhaltigen Heißteil hatten.

Alle Materialien eint ein Gehalt von Alkali- und/oder Erdalkalimetalloxiden, insbesondere Calciumoxid (CaO), teilweise auch Natriumoxid (Na_2O) von über 10% bis zu fast 50%:

Material	CaO-Gehalt und/oder	Na2O-Gehalt	Bemerkung
Mineralwolle	ca. 18%		Kalk-Natron-Glas (recycelt)/ Mineralfaser
Glasgewebe	10-20%		E-Glas
Glasfasernadelmatte	10-20%		E-Glas
Microtherm	10-20%		Ummantelung aus E-Glas
AES/Superwool	45-50%		Erdalkalische Silikatfaser

Sowohl die Hersteller von Mineralfaserprodukten (insbesondere die Firmen Rockwool und Saint Gobain), als auch die Hersteller von Glasgeweben und Glasfasernadelmatten (u. a. Frenzelit) warnen in ihren Datenblättern vor der Bildung von Chrom(VI)-Verbindungen:

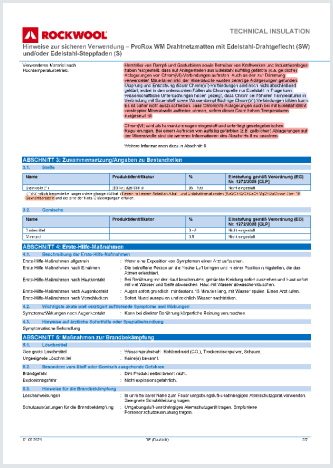
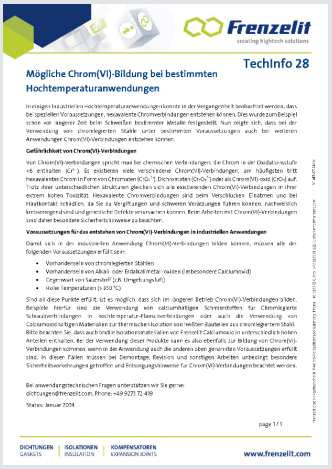

ROCKWOOL
TECHNICAL INSULATION

Abb. 13 Datenblatt der Firma Rockwool,
Hersteller von Mineralwollprodukten für die Industrie


Frenzelit
creating hightech solutions

TechInfo 28

Mögliche Chrom(VI)-Bildung bei bestimmten Hochtemperaturanwendungen

Abb. 14 Technische Information der Firma Frenzelit, Hersteller von E-Glasgeweben und E-Glasfasernadelmatten und Dichtungen

Motoren- und Turbinenhersteller – Beispiele Chromatkontamination:

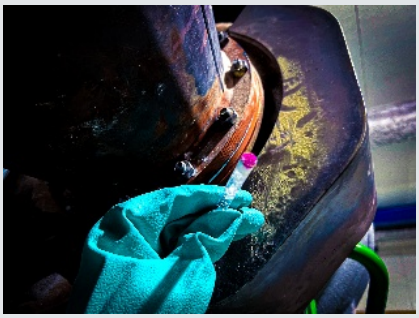


Abb.15 Innio Jenbacher

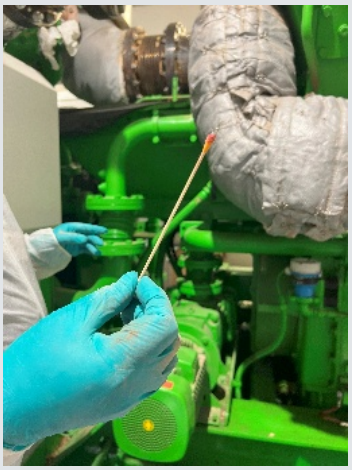


Abb.16 Innio Jenbacher



Abb.17 Innio Jenbacher



Abb.18 Innio Jenbacher



Abb.19 Innio Jenbacher



Abb.20 Innio Jenbacher

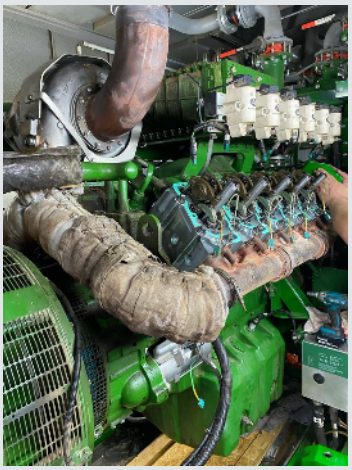

Abb.21 2G Energy


Abb.22 Liebherr


Abb.23 Caterpillar


Abb.24 Caterpillar


Abb.25 MAN


Abb.26 MWM


Abb.27 Siemens Gasturbine

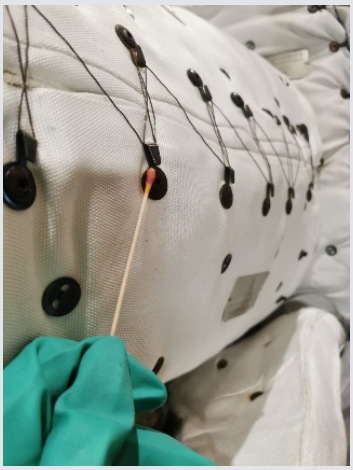

Abb.28 Siemens Dampfturbine

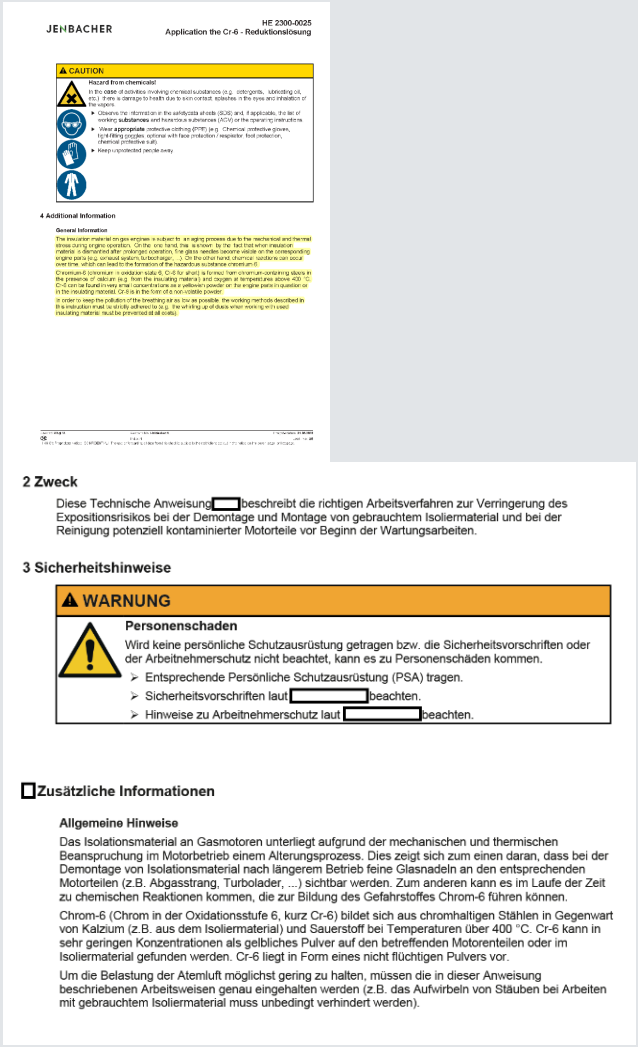

Abb.29 Siemens Gasturbine

In allen gezeigten Bildbeispielen gibt es einen direkten thermochemischen Bezug zwischen

- Chromhaltigem Edelstahlheißteil, mit einer Betriebstemperatur >300°C
- Calcium- und/oder natriumoxidhaltigem Dämmstoff/Isoliersystem in
- Sauerstoffoffene(r) Umgebung

Wie unschwer erkennbar, sind alle Arten von Energieerzeugern und ebenso alle unterschiedlichen Formen heutige Wärmedämmungskonzepte betroffen.

Die beiden selektiv ausgewählten Warnmeldungen von Motorenherstellern, die ihre Energieerzeuger bereits werkseitig mit alkali- und/oder erdalkalimetallhaltigen Dämmstoffen vertreiben, berichten über die Bildung von Calciumchromat durch Verwendung calciumhaltiger Isolationssystemen:



JENBACHER HE 2300-0025 Application the Cr-6 - Reduktionslösung

⚠ CAUTION
Hazard from chemicals!
In the case of activities involving chemical substances (e.g. detergents, lubricating oil, etc.) there is damage to health due to skin contact, splashes in the eyes and inhalation of the vapors
- Observe the information in the safety data sheets (SDS) and, if applicable, the list of working substances and hazardous substances (ADV) or the operating instructions
- Wear appropriate protective clothing (PPE) (e.g. Chemical protective gloves, tight-fitting goggles, optional with face protection / respirator, foot protection, chemical protective suit)
- Keep unprotected people away.

4 Additional Information
General Information
The insulation material on gas engines is subject to an aging process due to the mechanical and thermal stress during engine operation. On the one hand, this is known by the fact that when insulation material is dismantled after prolonged operation, fine glass needles become visible on the corresponding engine parts (e.g. exhaust system, turbocharger, ...). On the other hand, chemical reactions can occur over time, which can lead to the formation of the hexavalent substance chromium-6.
Chromium-6 (chromium in oxidation state 6, Cr-6 for short) is formed from chromium-containing steels in the presence of calcium (e.g. from the insulating material) and oxygen at temperatures above 400 °C. Chromium-6 is found in the form of yellowish deposits or the engine parts in question or in the insulating material. Cr-6 is in the form of a non-volatile powder.
In order to keep the pollution of the breathing air as low as possible, the working methods described in the instruction sheet, to strictly adhered to (e.g. the whirling up of dust when removing old insulating material must be prevented at all costs).

2 Zweck

Diese Technische Anweisung [redacted] beschreibt die richtigen Arbeitsverfahren zur Verringerung des Expositionsrisikos bei der Demontage und Montage von gebrauchtem Isoliermaterial und bei der Reinigung potenziell kontaminierter Motorteile vor Beginn der Wartungsarbeiten.

3 Sicherheitshinweise

⚠ WARNUNG

Personenschaden

Wird keine persönliche Schutzausrüstung getragen bzw. die Sicherheitsvorschriften oder der Arbeitnehmerschutz nicht beachtet, kann es zu Personenschäden kommen.

- Entsprechende Persönliche Schutzausrüstung (PSA) tragen.
- Sicherheitsvorschriften laut [redacted] beachten.
- Hinweise zu Arbeitnehmerschutz laut [redacted] beachten.

☐ Zusätzliche Informationen

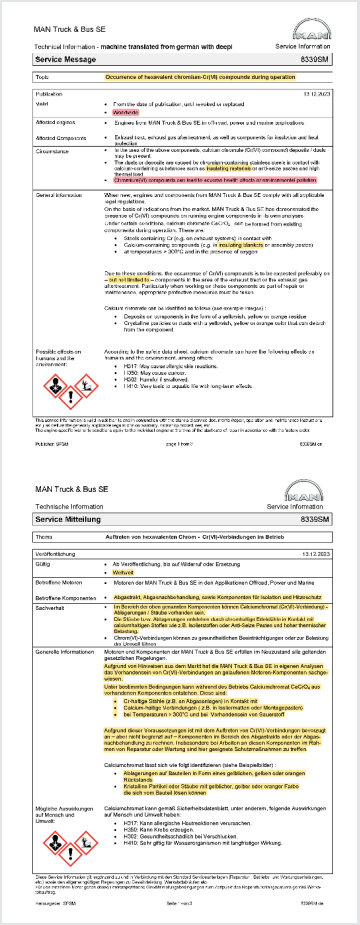
Allgemeine Hinweise

Das Isolationsmaterial an Gasmotoren unterliegt aufgrund der mechanischen und thermischen Beanspruchung im Motorbetrieb einem Alterungsprozess. Dies zeigt sich zum einen daran, dass bei der Demontage von Isolationsmaterial nach längerem Betrieb feine Glasnadeln an den entsprechenden Motorteilen (z.B. Abgasstrang, Turbolader, ...) sichtbar werden. Zum anderen kann es im Laufe der Zeit zu chemischen Reaktionen kommen, die zur Bildung des Gefahrstoffes Chrom-6 führen können.

Chrom-6 (Chrom in der Oxidationsstufe 6, kurz Cr-6) bildet sich aus chromhaltigen Stählen in Gegenwart von Kalzium (z.B. aus dem Isoliermaterial) und Sauerstoff bei Temperaturen über 400 °C. Cr-6 kann in sehr geringen Konzentrationen als gelbliches Pulver auf den betreffenden Motorenteilen oder im Isoliermaterial gefunden werden. Cr-6 liegt in Form eines nicht flüchtigen Pulvers vor.

Um die Belastung der Atemluft möglichst gering zu halten, müssen die in dieser Anweisung beschriebenen Arbeitsweisen genau eingehalten werden (z.B. das Aufwirbeln von Stäuben bei Arbeiten mit gebrauchtem Isoliermaterial muss unbedingt verhindert werden).

Abb. 30 Warnmeldung der österreichischen Firma Innio Jenbacher vor mit Calciumchromat kontaminierten Isolationselementen



MAN Truck & Bus SE
Technical Information - machine translated from german with deepl
Service Information
Service Message 8339SM

Topic	Occurrence of hexavalent chromium-Cr(VI) compounds during operation
Publication	13.12.2023
Valid	• From the date of publication, until revoked or replaced • worldwide
Affected engines	• Engines from MAN Truck & Bus SE in off-road, power unit and marine applications
Affected Components	• Exhaust track, exhaust gas aftertreatment, as well as components for insulation and heat protection
Circumstance	• In the area of the above components, calcium chromate (CrVI) compound deposits / dusts may be present. • The dusts or deposits are caused by chromium-containing stainless steels in contact with calcium-containing (e.g. as reference such as insulating materials or) hot exhaust gases and high thermal load. • Chromium(VI) compounds can lead to acute health effects or environmental pollution
General Information	When new, engines and components from MAN Truck & Bus SE comply with all applicable legal regulations. On the basis of indications from the market, MAN Truck & Bus SE has demonstrated the presence of Cr(VI) compounds on running engine components in its own engines. Under certain conditions, calcium chromate ($CaCrO_4$) can be formed from existing components during operation. These are: • Metals containing Cr (e.g. on exhaust systems) in contact with • Calcium-containing components (e.g. in insulating materials or assembly pastes) • at temperatures > 300°C and in the presence of oxygen Due to these conditions, the occurrence of CrVI compounds is to be expected preferably on – not restricted to – components in the area of the exhaust duct or the exhaust gas aftertreatment. Particularly when working on these components as part of repair or maintenance, appropriate protective measures must be taken. Calcium chromate can be identified as follows (see example images): • Deposits or components in the form of a yellowish, yellow or orange residue • Crystalline particles or dusts with a yellowish, yellow or orange color that can detach from the component
Possible effects on humans and the environment	According to the safety data sheet, calcium chromate can have the following effects on humans and the environment, among others: • H317: May cause allergic skin reactions. • H350: May cause cancer. • H330: Fatal if inhaled. • H410: Very toxic to aquatic life with long-term effects.

Publisher: SFSM page 1 from 2 8339SM en

MAN Truck & Bus SE
Technische Information
Service Information
Service Mitteilung 8339SM

Thema	Auftreten von hexavalentem Chrom – Cr(VI)-Verbindungen im Betrieb
Veröffentlichung	13.12.2023
Gültig	• Ab Veröffentlichung, bis auf Widerruf oder Ersetzung • Weltweit
Betroffene Motoren	• Motoren der MAN Truck & Bus SE in den Applikationen Offroad, Power und Marine
Betroffene Komponenten	• Abgasstrang, Abgasnachbehandlung, sowie Komponenten für Isolation und Hitzeschutz
Sachverhalt	• Im Bereich der oben genannten Komponenten können Calciumchromat (CaCrO4) Verbindungen / Ablagerungen / Stäube vorhanden sein. • Die Stäube bzw. Ablagerungen entstehen durch chromhaltige Edelstähle in Kontakt mit calciumhaltigen Stoffen (z.B. Isolierstoffen oder Anti-Seize Pasten und hoher thermischer Belastung. • CrororVI)-Verbindungen können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen oder zur Belastung der Umwelt führen.
Generelle Informationen	Motoren und Komponenten der MAN Truck & Bus SE erfüllen im Neuzustand alle geltenden gesetzlichen Regelungen. Aufgrund von Hinweisen aus dem Markt hat die MAN Truck & Bus SE in eigenen Analysen das Vorhandensein von Cr(VI)-Verbindungen an gebrauchten Motoren-Komponenten nachgewiesen. Unter bestimmten Bedingungen kann während des Betriebs Calciumchromat $CaCrO_4$ aus vorhandenen Komponenten entstehen. Dieser sind: • Chromhaltige Stähle (z.B. im Abgasstrang) in Kontakt mit • Calcium-haltige Verbindungen (z.B. in Isoliermatten oder Montagepasten) • bei Temperaturen > 300°C und bei Vorhandensein von Sauerstoff Aufgrund dieser Voraussetzungen ist mit dem Auftreten von Cr(VI)-Verbindungen bei+beaufschlagten – aber nicht begrenzt auf – Komponenten im Bereich des Abgastrakts oder der Abgasnachbehandlung zu rechnen. Insbesondere bei Arbeiten an diesen Komponenten im Rahmen von Reparatur oder Wartung sind hier geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen. Calciumchromat lässt sich wie folgt identifizieren (siehe Beispielbilder): • Ablagerungen auf Bauteilen in Form eines gelblichen, gelben oder orangen Rückstands • Kristalline Partikel oder Stäube mit gelblicher, gelber oder oranger Farbe die sich vom Bauteil lösen können
Mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt:	Calciumchromat kann gemäß Sicherheitsdatenblatt, unter anderem, folgende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben: • H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen. • H350: Kann Krebs erzeugen. • H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken • H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.

Diese Service Information ist explizit zur Verwendung mit den Original Serviceteilen (Reparatur- Betriebs- und Wartungsanleitungen, etc.) von der allgemeingültigen Regelungen zu Gewährleistung, Kundendienst usw. [illegible] Informationen keine Gültigkeit besitzen. Eine Haftung für Schäden, die durch diese Informationen [illegible] entstehen, wird ausgeschlossen.

Herausgeber: SFSM Seite 1 von 3 8339SM de

Abb. 31 Warnmeldung der deutschen Firma MAN Truck & Bus SE vor calciumhaltigen Isolationselementen und/oder Montagepasten

Zusammenfassung | weiterer Ausblick

Diese Zusammenfassung „Berichte aus der Praxis" ergänzen die bereits benannten Feldstudie und Feldbeobachtungen der Autoren und werden laufend mit fortgeführten Messungen, Analyseergebnissen hieraus, und neuesten Erkenntnissen und Entwicklungen ergänzt.

Die Anzahl der gemachten Erfahrungen, die Dokumentation mit Fotos, Filmen und Literaturbezügen zeigen auf, dass es sich bei der Entstehung krebserregender und chronisch umweltschädlicher Chromate, keineswegs -wie oft fälschlicherweise behauptet- um lediglich vereinzelte Vorfälle, sondern um ein weltweit bislang völlig unterschätztes Problem handelt und es zeigt sich ebenfalls, dass diese Problematik seit Jahrzehnten, korrekt eingeschätzt seit Beginn der Substitution von asbesthaltigen Isolationsstoffen und -systemen, existiert.

Die Messungen und deren Ergebnisse beruhen mittlerweile nicht mehr nur auf örtlich gemachten Schnelltests, die vor allem öfters zu „falsch-negativen" Ergebnissen führen.

Sowohl die mit dem mobilen Labor „Chrom(VI) Testkit TK01" der Firma SEEF B.V. vorgenommenen Untersuchungen, als auch die in anerkannten Testlabors untersuchten Materialproben, als auch die mit der Filterpumpe „SG 10-2" von der Firma GSA mbH gemachten Luftuntersuchungen zeichnen ein durchgehend beunruhigendes Gesamtbild, nämlich die regelmäßige Gefährdung von Mensch und Umwelt durch krebserregende Stäube (einatembare Fraktion), die sowohl inhalativ als auch dermal ein hohes Gesundheitsrisiko darstellen.

Bei den Analysen wurden selbst die in einigen Ländern noch nicht angepassten und somit im Vergleich zu den bereits festgelegten niedrigen Werten in Deutschland, Frankreich und den Niederlanden, deutlich höheren Grenzwerte überschritten.

Da es für KMR-Stoffe wie Chrom(VI)-Verbindungen am Arbeitsplatz keine Schwellenwerte gibt, die ein gewisses Maß an Schadstoffen akzeptieren, ist für Chromate keine Akzeptanzkonzentration festgelegt; maßgeblich ist das Minimierungsgebot der EU-Richtlinie 2004/37/EG.

Sobald Chromate als Feststoff oder Staub vorhanden sind, gilt bereits ein Gefahrenbereich „mittleres Risiko", ab einer Luftkonzentration von

0,001 mg/m³

befindet man sich im Bereich „hohes Risiko", was normales Arbeiten im Umkreis der Exposition unmöglich macht und ein Weiterführen von Arbeiten bis zur Eliminierung der Quelle faktisch ausschließt.

Leider haben es weder die Industrie, noch die Behörden bis heute verstanden, wie hoch die Gefahr für Mensch und Umwelt tatsächlich ist.

Mögen diese Feldbeobachtungn und erweiterten Beobachtungen dazu führen, dass ein Umdenken stattfindet, damit sich die Exposition-Risiko-Beziehung von 1:250 (tödlichen) Krebserkrankungen bei einer Exposition von 0,001 mg/m³ nicht erfüllt.

Die Studienreihe wird weitergeführt und laufend ergänzt.

Breslau, im Februar 2025

©Die Chromatexperten

Ergänzungen | Fortschreibungen

Revision: 1.x
Datum __.__.____

5. Handlungsempfehlungen

Der Bereich Handlungsempfehlungen skizziert die vorschriftsmäßigen Maßnahmen, die anzuwenden sind, wenn der Kontakt von sog. „KMR-Stoffen" (krebserregende, mutagene und reprotoxische Substanzen) durch Mitarbeiter nicht ausgeschlossen werden kann und ist hauptsächlich von der EU-Direktive 2004/37/EG in nationale Vorschriften umgesetzt.

Die nachfolgenden Punkte sind aus der deutschen Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) und diversen Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) abgeleitet.

Die Aufstellung zeigt deutlich, welchen immensen Einfluß die Präsenz von sechswertigen Chromverbindungen auf bisherige Arbeitsabläufe haben wird.

Wenn die Erkenntnisse aus dieser Feldbeobachtung verstanden werden, steht die komplette energieerzeugende Branche vor einem wahren Paradigmenwechsel.

Es ist zu beachten, dass alle Maßnahmen lediglich der Bekämpfung der bereits stattgefundenen Kontamination Rechnung tragen, um das nachweislich vorhandene Risiko für Mensch und Umwelt zu beherrschen und weiteren Schaden zu verhindern.

Langfristig gesehen ist das sog. „Minimierungsgebot" anzuwenden, also **gefährliche Substanzen durch weniger bzw. bestenfalls gar nicht gefährliche Substanzen zu ersetzen** (Substitution (5.2.1)).

Da Chromate vor der Inbetriebnahme der wärmegedämmten Anlagen nicht vorhanden sind, sondern erst durch und nach Inbetriebnahme, gilt es vorrangig langfristig, die Quelle der Chromatbildung, also die calciumhaltige Isolierung, zu ersetzen. Calciumfreie Isolationssysteme sind bereits erhältlich und haben bessere Eigenschaften als der heutige Stand der Technik.

Ein weiterer Ansatz wäre die Verwendung nicht chromhaltiger Heißteile, eine solche Änderung könnte aber nur im Neubau im Rahmen von Weiterentwicklungen in der Motorentechnik erfolgen.

Für die abertausenden, bereits im Betrieb befindlichen Anlagen scheint aus heutiger Sicht nur eine Entfernung der heutigen Dämmstoffe, eine tiefe Reinigung der Anlage (Dekontamination) und anschließende Aufbringung besagter (erd-)alkalimetalloxidfreier Isolierungen in Frage zu kommen.

Auch wenn diese neuartigen Dämmsysteme etwas teurer in der Erstanschaffung sind und die Dekontamination und Entsorgung der alten Wärmedämmung ebenfalls kurzfristige Mehrkosten erzeugt, dürften diese -wenn auch nicht eingeplanten- Aufwendungen immer noch günstiger sein, als die betroffenen Anlagen nach den u.a. Maßnahmenpunkten permanent weiterzubetreiben.

Insofern wird sich die Geschichte wiederholen, wie man sie bereits aus Zeiten der Asbestsanierung kennt. Für das komplette Maßnahmenpaket, dessen Planung, Durchführung und Überwachung, empfiehlt sich die Betreuung durch fachkundige Sicherheitsbeauftragte, die auch über die nötigen Kontakte zu externen Unternehmen verfügen, die für die Umsetzung der Maßnahmen erforderlich sind.

5.1 Sofortmaßnahmen

5.1.1 Technische Maßnahmen

Einhausung und Absaugung

- Installation vollständig geschlossener Arbeitsbereiche

- Unterdruckhaltung mit mindestens 20 Pascal
- Mehrstufige Filteranlagen mit HEPA H13/H14
- Luftwechselrate > 10-fach pro Stunde
- Getrennte Zu- und Abluftführung

Staubminimierung

- Einsatz staubarmer Demontageverfahren
- Befeuchtung der Arbeitsbereiche wo möglich
- Spezialwerkzeuge für schonendes Arbeiten
- Staubabsaugung direkt am Entstehungsort
- Regelmäßige Oberflächenreinigung

Arbeitsplatzgestaltung

- Einrichtung von Schwarz-Weiß-Bereichen
- Professionelle Dekontaminationsschleusen
- Separate Materialtransportwege
- Kennzeichnung kontaminierter Bereiche
- Speziell ausgestattete Reinigungszonen

5.1.2 Organisatorische Maßnahmen

Zugangsbeschränkungen

- Zutritt nur für geschultes Personal
- Dokumentation aller anwesenden Personen
- Zeitliche Begrenzung der Arbeitszeiten
- Rotationsprinzip bei exponierten Tätigkeiten
- Koordination paralleler Arbeiten

Arbeitsabläufe

- Detaillierte Arbeitsanweisungen
- Gefährdungsbeurteilung für jeden Arbeitsschritt
- Festlegung von Notfallprozeduren
- Regelmäßige Arbeitsplatzüberwachung
- Dokumentation aller Tätigkeiten

Hygienemaßnahmen

- Strikte Trennung von Arbeits- und Privatkleidung
- Regelmäßiger Wechsel der Schutzkleidung
- Duschmöglichkeiten nach Arbeitsende
- Verbot von Essen/Trinken im Arbeitsbereich
- Regelmäßige Reinigung der Arbeitsbereiche

5.1.3 Persönliche Schutzausrüstung

Atemschutz

- Gebläseunterstützte Vollmasken
- P3-Filter für Schwebstoffe
- Regelmäßige Wartung und Prüfung
- Individuelle Anpassung, Dichtsitzprüfung vor jedem Einsatz

Schutzkleidung

- Einweg-Schutzanzüge Kategorie III Typ 5/6
- Chemikalienbeständige Handschuhe
- Spezielle Sicherheitsschuhe mit Überziehern
- Schutzbrille mit Seitenschutz
- Kopf- und Nackenschutz

Zusatzausrüstung

- Kommunikationssysteme
- Persönliche Messgeräte
- Notfallausrüstung
- Reinigungsmaterial
- Erste-Hilfe-Ausrüstung

5.2 Langfristige Maßnahmen

5.2.1 Substitution

Alternative Materialien

- Entwicklung chromfreier Isolationslösungen
- Einsatz von Cleansulation-Produkten
- Innovative Befestigungssysteme
- Verbesserte Beschichtungstechnologien
- Mechanisch stabilere Konstruktionen

Konstruktive Änderungen

- Optimierung der Isolationsgeometrien
- Verbesserte Zugänglichkeit für Wartung
- Modulare Aufbauweise
- Integrierte Überwachungssysteme
- Temperaturoptimierte Auslegung

Prozessanpassungen

- Überarbeitung der Wartungsintervalle

- Präventiver Austausch gefährdeter Teile
- Optimierung der Betriebsparameter
- Anpassung der Reinigungsverfahren
- Entwicklung spezieller Werkzeuge

5.2.2 Überwachung

Messtechnische Überwachung

- Kontinuierliche Luftmessungen
- Regelmäßige Wischproben
- Persönliche Dosimetrie
- Biomonitoring
- Materialanalysen

Dokumentation

- Digitales Wartungsmanagement
- Lückenlose Expositionsdokumentation
- Erfassung von Materialwechseln
- Protokollierung von Störfällen, Langzeitarchivierung aller Daten

Qualitätssicherung

- Regelmäßige Audits
- Zertifizierung der Prozesse
- Überprüfung der Schutzmaßnahmen
- Validierung der Messverfahren
- Kontrolle der Dokumentation

5.2.3 Qualifikation

Grundausbildung

- Gefährdungspotential von Chrom(VI)
- Arbeitsschutzmaßnahmen
- Notfallverhalten
- Dokumentationspflichten
- Rechtliche Grundlagen

Praktische Schulungen

- Handhabung der PSA
- Dekontaminationsverfahren
- Probenahmetechniken
- Reinigungsmethoden
- Notfallübungen

Weiterbildung

- Regelmäßige Auffrischungskurse
- Updates zu neuen Vorschriften
- Erfahrungsaustausch
- Best-Practice-Workshops
- Zertifizierte Fortbildungen

5.2.4 Prävention

Gesundheitsvorsorge

- Regelmäßige arbeitsmedizinische Untersuchungen
- Biomonitoring-Programme
- Psychologische Betreuung
- Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung
- Betriebliches Gesundheitsmanagement

Umweltschutz

- Entsorgungskonzepte
- Emissionsminimierung
- Ressourcenschonung
- Recyclingstrategien
- Umweltmonitoring

Wirtschaftlichkeit

- Kostenbewertung der Maßnahmen
- Investitionsplanung
- Versicherungsaspekte
- Haftungsminimierung
- Imageschutz

6. Schlussfolgerungen

6.1 Expositionsrisiken

Die ermittelten Messwerte aus einem Mix unterschiedlicher Isolationsmaterialien und -systeme belegen eine systematische und signifikante Überschreitung der geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte:

- **Die gemessenen Chrom(VI)-Konzentrationen von 2,33-6,99 µg/m³ im direkten Arbeitsbereich überschreiten viele nationalen Grenzwerte um ein Mehrfaches**
- **Selbst bei der Hintergrundbelastung (0,526-0,556 µg/m³, Mindestwerte) ist eine Überschreitung des Beurteilungsmaßstabs von 1 µg/m³ nicht auszuschließen**
- **Die Gefährdung betrifft nicht nur direkt exponierte Mitarbeiter, sondern auch Personen im erweiterten Arbeitsumfeld**
- **Die vertikale Verteilung der Belastung zeigt eine effektive Ausbreitung der kontaminierten Stäube im gesamten Arbeitsbereich**

6.2 Systemische Problematik

Die Feldbeobachtung deckt fundamentale Schwachstellen in der bisherigen Praxis auf:

- **Die historische Entwicklung der Isolationsmaterialien hat zu einer inhärenten Problematik geführt**
- **Die Kombination von calciumhaltigen Dämmstoffen mit chromhaltigen Komponenten schafft ideale Bedingungen für die Chromatbildung**
- **Mechanische Belastungen und Alterung verstärken die Entstehung und anschließende Freisetzung von Chromaten**
- **Bestehende Schutzkonzepte sind unzureichend für die identifizierten Gefährdungen**

6.3 Verschleppungsrisiken

Die Untersuchung zeigt multiple Verschleppungswege:

- **Primäre Staubfreisetzung durch direkte Arbeiten an den Isolierungen**
- **Sekundäre Kontamination durch Aufwirbelung und Verteilung**
- **Verschleppung über Werkzeuge, Arbeitsmittel und persönliche Schutzausrüstung**
- **Ausbreitung über Lüftungssysteme und bauliche Öffnungen**

6.4 Wirtschaftliche Implikationen

Die erforderlichen Maßnahmen haben erhebliche wirtschaftliche Auswirkungen:

- **Unmittelbare Investitionen in Schutzausrüstung und technische Einrichtungen**
- **Erhöhter Personal- und Zeitaufwand bei Wartungsarbeiten**
- **Zusätzliche Kosten für Überwachung und Dokumentation**
- **Langfristige Aufwendungen für Substitution und Prävention**

6.5 Paradigmenwechsel erforderlich

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit eines grundlegenden Umdenkens:

- **Bisherige Praktiken sind nicht mehr zeitgemäß und rechtlich bedenklich**
- **Technische und organisatorische Sofortmaßnahmen sind unerlässlich**
- **Langfristige Substitution chromatbildender Materialien ist alternativlos**
- **Ganzheitliche Präventionsstrategien müssen entwickelt werden**

7. Empfehlungen

Basierend auf den Studienergebnissen werden folgende Empfehlungen ausgesprochen:

7.1 Strategische Ausrichtung

Die Branche sollte einen koordinierten Ansatz verfolgen:

- **Entwicklung einer gemeinsamen Strategie zur Bewältigung der Chromatproblematik**
- **Etablierung von Industriestandards für nicht chromatbildende Isolationslösungen**
- **Aufbau von Kompetenznetzwerken für den Erfahrungsaustausch**
- **Koordinierte Forschungs- und Entwicklungsinitiativen**

7.2 Technische Innovation

Fokussierung auf zukunftsfähige Lösungen:

- **Forcierte Entwicklung (erd-)alkalimetallfreier oder -armer Isolationsmaterialien**
- Optimierung der Verarbeitungs- und Montagetechniken
- **Integration von Überwachungssystemen in neue Anlagenkonzepte**
- **Verbesserung der Dekontaminations- und Reinigungstechnologien**

7.3 Organisatorische Neuausrichtung

Anpassung der betrieblichen Strukturen:

- **Implementation systematischer Gefährdungsbeurteilungen**
- **Etablierung professioneller Schulungs- und Qualifizierungsprogramme**
- **Aufbau effektiver Dokumentations- und Nachweissysteme**
- **Entwicklung spezifischer Notfall- und Interventionspläne**

7.4 Regulatorische Maßnahmen

Empfehlungen für den regulatorischen Rahmen:

- **Verschärfung der Überwachung und Kontrolle**
- **Standardisierung der Messverfahren und Dokumentation**
- **Harmonisierung internationaler Grenzwerte und Standards**
- **Entwicklung spezifischer Richtlinien für die Branche**

7.5 Präventive Strategien

Langfristige Präventionsansätze:

- **Systematische Substitution chromatbildender Materialien (Isolierung, Dichtungen, Pasten)**

- **Implementierung präventiver Wartungskonzepte**
- **Entwicklung verbesserter Arbeitsschutzstrategien**
- **Etablierung kontinuierlicher Verbesserungsprozesse**

7.6 Forschungsbedarf

Identifizierte Forschungsschwerpunkte:

- **Weiterentwicklung der Messtechnik und Analyseverfahren**
- **Untersuchung von Langzeitauswirkungen und chronischen Effekten**
- **Optimierung von Dekontaminations- und Reinigungsmethoden**
- **Entwicklung innovativer Schutzkonzepte**

7.7 Wirtschaftliche Aspekte

Empfehlungen zur Kostenoptimierung:

- **Entwicklung kosteneffizienter Schutzmaßnahmen**
- **Optimierung der Arbeitsabläufe und Prozesse**
- **Nutzung von Synergieeffekten bei der Implementierung**
- **Berücksichtigung der Lebenszykluskosten bei Investitionen**

Diese Empfehlungen verstehen sich als Leitlinien für die zukünftige Entwicklung der Branche und sollten als Grundlage für die Erarbeitung spezifischer Handlungskonzepte dienen.

8. Literaturverzeichnis (Quellen/Bezug)

Siehe Dokument „Sicherheit für Mensch und Umwelt" vom 06.12.2024

Ergänzend: TRGS 561, Fassung vom 4. Mai 2026; SEEF B.V., Kennisbank zur Cr(VI)-Analytik in thermischer Isolierung, seefbv.com, Abruf November 2026.

9. Test- und Messmethodik (Gesamtstaubanalyse)



9.1 Chrom(VI)-Swabtest ST01



9.2 Cr(VI) Testkit TK01



9.3 Cr(VI)-Laboranalyse

9.1 „Chrom(VI)-Schnelltests"

Bei allen bisherigen Untersuchungen und Nachforschungen wurden sog. „Schnelltests" zur Erst-Detektion und -Identifizierung von Chrom(VI)-Verbindungen verwendet.

Hierbei wird eine Testspitze, getränkt mit nachfolgend beschriebenen DPC, über eine zu testende Oberfläche gewischt oder betupft, um eine kolorimetrische Reaktion bei Präsenz von Chrom(VI) herbeizuführen.

Die Funktionsweise der Schnelltests, die von unterschiedlichen Firmen (z. B. Produkt „HexChecks" (Figure Engineering Ltd. USA) oder Produkt „TK11" (MATInspired NL) angeboten werden, basiert auf einer „kolorimetrischen Methode"; beim Testverfahren wird eine chemische Reaktion mit 1,5-Diphenylcarbazid (DPC) verwendet, die in Gegenwart von Chrom(VI) zu 1,5-Diphenylcarbazon oxidiert und dabei eine violette bis rosa Färbung erzeugt.

Die Intensität der Farbe ist proportional zur Chrom(VI)-Konzentration und kann visuell oder mit einem Kolorimeter ausgewertet werden.

Die Testergebnisse sind ziemlich verlässlich, **falsch positive Ergebnisse treten sehr selten auf, wohl aber falsch negative Ergebnisse, weil es vorkommen kann, dass Stäube und Ablagerungen, aber auch ölige Oberflächen verhindern können, dass beim Abstrich die Reaktion zwischen Chrom(VI) und dem DPC erfolgt**.

Seit 2023 bietet die niederländische Firma „SEEF B.V." ein speziell für chromatbelastete Wärmedämmungen entwickeltes Schnelltest-System „Chromate Speedtest" an, welches ebenfalls nach o.g. Verfahren konzipiert ist, aber etwas unempfindlicher gegen Staubüberlagerungen ist, diese aber trotzdem nicht gänzlich verhindern kann.

Praxistests haben gezeigt, dass die **Swabtests eine „richtig-positive" Trefferquote von über 99%** und eine **„falsch-negativ"-Quote von unter 50% aufweisen**, daher wurde entschieden, diese Testmethode zukünftig beizubehalten.

Vorteilhaft bei der Auswahl der Testmethoden sei zu erwähnen, dass die Firma SEEF sowohl ein mobiles Labor zur relativ einfachen, aber tieferen Cr6-Analyse entwickelt hat, welches auch stationär verwendet werden kann und einen relativ zügigen laborähnlichen Test für Materialproben bietet.

9.2 „mobiles Labor" Cr(VI) Testkit TK01 (SEEF B.V.)

Das TK01 Chrom-6 Testkit ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Vor-Ort-Analyse von Chrom-6 und wurde u.a. für die Messung von Calciumchromat in Isolierungen, Montagepasten, Schmiermitteln und Edelstahlteilen entwickelt.
Die Analyse erfolgt innerhalb von 45 Minuten und erlaubt die gleichzeitige Untersuchung von 6

Proben.
Das patentierte Verfahren verhindert während des Analyseprozesses die Reduktion von Chrom-6 zu Chrom-3 und minimiert gleichzeitig Interferenzen durch Zink und Aluminium.

Kleinere Materialproben oder sog. Wischabstriche werden mit bestimmten chemischen Substanzen vorbehandelt und in Teströhrchen erhitzt, so dass eine fast 100% sichere Kolorimetrie erfolgen kann.

In der Praxis konnten durch weiterführende Tests nach diesem Verfahren z. B. stark staubbedeckte oder anderweitig verschmutzte Bereiche trotz negativem Schnelltest im Nachhinein als positiv und somit chromathaltig erkannt werden.

9.3 Laboranalyse (Wischtest | Materialproben) (SEEF B.V.)

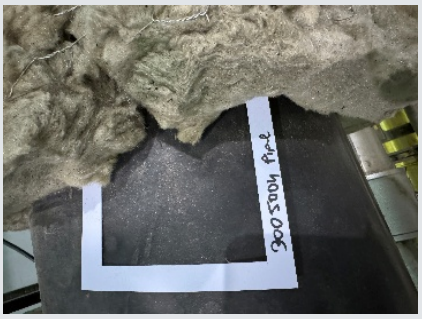
Beim sog. „Wischtest" wird ein räumlich definierter Bereich von 10 x 10 cm mit einem Tuch diagonal und horizontal abgewischt, um die Oberflächenstäube aufzunehmen und im Tuch zu binden.

Anschließend wird das Tuch, sofern es nicht mit der mobilen Labormethode untersucht wird zur Analyse der Chrom(VI)-Beladung für den getesteten Bereich an das Labor gesendet.
Einige Tage später wird seitens des Labors die exakte Kontaminierung in ppm | mg/kg schriftlich mitgeteilt; die Wischprobe wird zusätzlich noch auf andere Schwermetalle untersucht.

Bei den Materialproben werden Proben aus Faserstäuben oder andere Ablagerungen ans Labor gesendet und anschließend wie beim Wischtest nach gleichem Procedere analysiert und ausgewertet.



9.3 Wischtest



9.3 Wischtest


9.3 Wischtestanalyse mit TK01



9.3 Materialprobe



9.3 Materialprobe


9.3 Materialprobenanalyse mit TK01

10. Test- und Messmethodik (Hintergrundbelastung)



10.1 Probenahmegerät



10.1 Pumpkopf



10.1 Messprinzip

10.1 „Probenahmegerät SG 10-2 (GSA)"

Das **Probenahmegerät SG10-2** inkl. Ladegerät für die **personengetragene** und **stationäre** Probenahme von Gefahrstoffen bis 12 l/min nach EN 481.

Das **Probenahmegerät SG10-2** wurde für die Gefahrstoffmessung entwickelt, insbesondere wenn **hohe Volumenströme** benötigt werden.

Das SG10-2 bietet einen Volumenstrom von 1- 12 l/min und ermöglicht so deutlich verkürzte Messzeiten.

Die verschiedenen, durch IFA lizensierte Probenahmeköpfe ermöglichen eine Messung des einatembaren Staubes (**E-Staub, Gesamtstaub**) und/oder der alveolaren Staubfraktion (A-Staub, Feinstaub).

Zur Bestimmung von Chrom(VI)-Verbindungen in der Atemluft ist ein Volumenstrom von 10l/min. voreingestellt.

Die Messungen wurden auf Grundlager der DGUV (Deutsche gesetzliche Unfallversicherung) gemäß Information 213-505 als anerkanntes Messverfahren zur Feststellung der Konzentration von sechswertigem Chrom in der Luft in Arbeitsbereichen durchgeführt.

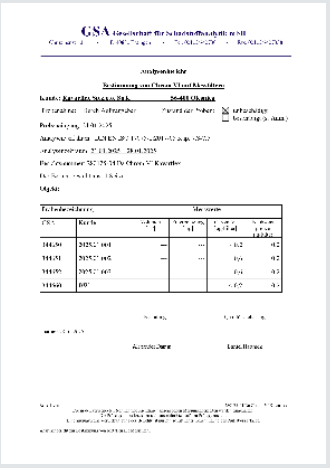
Einige Tage nach Zusendung des in der Analyselösung aufgelösten Filters erfolgt das Ergebnis in Mikrogram/Filter, anschließend erfolgt die Umrechnung und Auswertung (Gesamtmenge Luft, daraus abgeleitet Mikrogramm/Kubikmeter).



10.2 aufgelöster Filter in Lösung



10.2 Analyselösung



10.2 Analysezertifikat

11. Ausblick und weiterführende Untersuchungen

11.1 Status dieser Feldbeobachtung

Die Feldstudie zur Chrom(VI)-Problematik bildet die Grundlage der Studienreihe.
Sie bildet die wissenschaftliche und methodische Basis für alle weiteren Untersuchungen. Die Beobachtungen aus der Feldbeobachtung FB01 und Messungen und Analysen aus der Feldbeobachtung FB02 erweitern die Betrachtungsperspektive.
Zukünftige und vergangene Messungen und Erfahrungswerte werden als ergänzende Datensammlung („Beobachtungen aus der Praxis"), wobei die die etablierten Methoden und Parameter der Feldstudie als Standard dienen.

11.2 Repräsentativität und Übertragbarkeit

Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass der untersuchte MWM-Motor aus der Feldstudie zufällig als erstes Aggregat mit modernster Messtechnik analysiert wurde.

Bemerkenswert ist dabei, dass dieser Motor im Vergleich zu anderen Herstellern eine relativ geringe Menge an textilen Isolierungen aufweist. Die untersuchten Isolationskassetten sind professionell und hochwertig, berücksichtigen aber die Chromatentstehung nicht. Viele andere Motorenhersteller setzen deutlich mehr textile Isoliertechnik und deutlich minderwertigere Kassetten ein, was potenziell zu noch höheren Belastungen führen könnte.

11.3 Erweiterte Befunde

Die in abnehmbaren Metallkassetten nachgewiesenen signifikanten Chrom(VI)-Konzentrationen entstehen nach dem klaren thermochemischen Muster in Bereichen, wo calciumhaltige Dämmstoffe mit Luftzufuhr ("sauerstoffoffen") verbaut wurden. Diese Beobachtung stützt die theoretischen Überlegungen zum Bildungsmechanismus der Chromate praxisbezogen einmal mehr.

11.4 Automobiler Bereich

Erste Voruntersuchungen haben auch Chromate im Motorraum verschiedener PKW-Modelle (insbesondere bei Mercedes und Audi) nachgewiesen. Hierzu werden derzeit weitere dedizierte Studien vorbereitet. Die möglichen Implikationen dieser Befunde für den automobilen Sektor sind Gegenstand laufender Untersuchungen.

11.5 Gesellschaftliche Relevanz

Die Tragweite der Problematik wird besonders deutlich, wenn man die vielfältigen Einsatzbereiche der betroffenen Motoren betrachtet. Aggregate vom untersuchten Typ finden sich unter anderem in:

- Krankenhäusern, öffentlichen Gebäuden (Energieversorgung | Notstromaggregate)
- Passagierschiffen
- Kraftwerken
- Industrieanlagen

Dies unterstreicht die Notwendigkeit weiterer systematischer Untersuchungen und präventiver Maßnahmen.

11.6 Ausblick

Die vorliegenden Erkenntnisse markieren erst den Anfang einer umfassenden Bestandsaufnahme. Die identifizierten Expositionsrisiken und ihre potenziellen Auswirkungen auf Arbeitssicherheit und öffentliche Gesundheit erfordern weitere detaillierte Untersuchungen. Basierend auf den hier entwickelten Methoden und Standards werden systematisch weitere Anwendungsbereiche und Szenarien analysiert.

Die Ergebnisse dieser Feldbeobachtung legen nahe, dass eine branchenübergreifende Neubewertung der Verwendung calciumhaltiger Hochtemperaturisolierungen dringend erforderlich ist. Der Schutz der exponierten Arbeitnehmer und die Entwicklung sicherer Alternativen sollten dabei im Vordergrund stehen.

11.7 weitere Dokumentation

Diese Feldbeobachtung und alle folgenden Auswertungen werden auf Basis der Feldstudie erfolgen und unterscheiden sich durch Hinweise zu 2.1 (Arbeitssituation und -umgebung, Zustand der Isolierung), 2.2 (Messmethoden und Durchführung), sowie 2.2.2 (Gesamtstaubanalyse), sowie den Messergebnissen; alle anderen Informationen können, wenn auch mit geringen Abweichungen, im gleichen Kontext behandelt und interpretiert werden.

Versionsverlauf

Version	Datum	Änderung
1.0	Januar 2025	Erstfassung
1.1	November 2026	Neusatz im Gestaltungssystem der Chromatexperten; Schreibweise Chrom(VI) vereinheitlicht. Aktualisierung: Bewertung nach dem Beurteilungsmaßstab von 1 µg/m³ (TRGS 910, TRGS 561), keine Akzeptanzkonzentration; Luftmesswerte (Standardverfahren GSA) als Mindestwerte gekennzeichnet, mit Angaben von SEEF B.V. zur Wiederfindung; britischer Grenzwert berichtigt (EH40: 0,01 mg/m³); niederländischer Grenzwert nach Arbobesluit; TRGS 561 in der Fassung vom 4. Mai 2026 aufgenommen; Querverweise auf Feldstudie und Feldbeobachtungen umgestellt; Technische Regeln für Gefahrstoffe.