

Ersetzt Ausgabe Januar 2008

**Inhalt:**

- 1 Geltungsbereich
- 2 Einleitung
- 3 Entschichtungsmechanismen
- 4 Sicherheit und Umweltschutz
- 5 Entschichtungsverfahren
  - 5.1 Chemische und elektrochemische Verfahren
    - 5.1.1 Chemisch
    - 5.1.2 Elektrochemisch
    - 5.1.3 Salzschnmelzen
    - 5.1.4 Einsatz in der Praxis
  - 5.2 Mechanische Verfahren
    - 5.2.1 Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide
    - 5.2.2 Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide
    - 5.2.3 Hydromechanische Verfahren
  - 5.3 Thermische Verfahren
    - 5.3.1 Sonderverfahren
- 6 Anwendungsgebiete
- 7 Abtragverfahren im Vergleich
  - 7.1 Abtragleistungen
    - 7.1.1 Trockeneis-Laserstrahl-Verfahren
    - 7.1.2 Wasser- und Wasserabrasivstrahlverfahren
    - 7.1.3 Abrasivstrahlen
    - 7.1.4 Schleifen
    - 7.1.5 Chemischer Abtrag
  - 7.2 Bewertung der Verfahren
- 8 Schrifttum

**1 Geltungsbereich**

Das Merkblatt enthält Informationen über Verfahren zum Entschichten von thermisch gespritzten Schichten und gibt Empfehlungen zur fachgerechten Auswahl eines geeigneten Verfahrens.

**2 Einleitung**

Beim Abtragen thermisch gespritzter Schichten sind drei Fälle Entschichten, lokales Entschichten und teilweises Abtragen zu unterscheiden. Entschichten bezeichnet die vollständige Entfernung des Schichtwerkstoffs von einem Bauteil, lokales Entschichten ist die örtlich begrenzte Entfernung der Schicht bis auf den Substratwerkstoff und teilweises Abtragen bezeichnet das Entfernen von Teilen der Schicht, ohne dass der Substratwerkstoff (Grundwerkstoff) freigelegt wird.

Entschichten und Abtragen einer thermisch gespritzten Schicht sind häufig durchgeführte Arbeitsschritte bei der *Fertigung*, *Reparatur* und beim *Recycling* beschichteter Bauteile.

Bei der *Fertigung* wird die gespritzte Schicht durch teilweises Abtragen auf die geforderten Endmaße gebracht. In einigen Fällen wird eine aufgetragene Schicht aus Funktionszwecken lokal abgetragen. Dies kann eine ökonomisch interessante Alternative zum Maskieren der Bereiche sein. Schließlich wird das Entschichten auch als Nacharbeit an Beschichtungen, die die gesetzten Qualitätsanforderungen nicht erfüllen, durchgeführt.

Das Abtragen von Schichten zur *Reparatur* wird an Bauteilen mit hohem Materialwert und Fertigungsaufwand, durchgeführt. Triebwerksteile von Gas-turbinen, die mit Wärmedämm- und Verschleißschutzschichten ausgestattet sind, werden zu Inspek-

tionszwecken, oder weil die Schicht gealtert ist, entschichtet. Aufgrund der hohen Fertigungskosten vieler Komponenten, ist die Entfernung der schadhafte Beschichtung mit dem Ziel der Wiederverwertung des Bauteils ökonomisch sinnvoll. Eine Beschädigung des Grundwerkstoffs muss bei der Wiederverwendung der Bauteile vermieden werden.

Das Trennen von Schicht und Grundwerkstoff durch Entschichten ermöglicht für das *Recycling* eine höherwertige Wiederverwendung der Materialien, da Schichtwerkstoff und Substratwerkstoff sortenrein vorliegen.

**3 Entschichtungsmechanismen**

Zum Abtrag einer Schicht muss der Zusammenhalt zwischen der Schicht und dem Substrat oder innerhalb der Schicht überwunden werden. Die Kräfte zum Entfernen der Schicht können mittels unterschiedlicher physikalischer Mechanismen aufgebracht werden.

Ziel ist eine teilweise oder vollständige, unter Umständen auch lokal begrenzte Entfernung der Schicht, ohne Beschädigung des Substrats. Unsicher zu stellen, dass das Substrat nicht beschädigt wird, ist der Mechanismus des gewählten Entschichtungsverfahrens nur die Schicht angreifen und nicht das Substrat. Ist dieser Fall gegeben wird von einem selektiven Entschichtungsmechanismus gesprochen. Damit ein Entschichtungsmechanismus selektiv wirken kann, müssen bedeutende Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften zwischen Schicht und Substrat vorliegen. Es ist jedoch nicht immer erforderlich und ökonomisch sinnvoll, einen selektiven Mechanismus zum Abtragen einer Schicht einzusetzen.

Die physikalischen Mechanismen, die beim Entfernen von Schichten genutzt werden, lassen sich in drei Klassen einteilen:

**Tabelle 1. Unterteilung der Wirkmechanismen für Abtragverfahren.**

Mechanismen	Beispiele
chemisch/ elektro- chemisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>chemisch</li> <li>elektrochemisch</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- wässrige/organische Lösung</li> <li>- Salzschnmelze</li> <li>- Oxidation/Reduktion</li> <li>...</li> </ul>
mecha- nisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>schnei- dend / spanab- hebend</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>geometrisch bestimmte Schneide</li> <li>geometrisch unbestimm- te Schneide</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Drehen</li> <li>- Fräsen</li> <li>...</li> <li>- Schleifen</li> <li>- Abrasivstrahlen, trocken</li> <li>- Abrasivstrahlen, feucht</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufprall- mecha- nismus</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wasserstrahl</li> <li>- Trockeneis</li> <li>- Aufprallstrahlen (Kugeln,...)</li> </ul>
thermisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>kryogen / Kälte</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trockeneis</li> <li>- Flüssigstickstoff</li> <li>...</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wärme</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Laser</li> <li>...</li> </ul>

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beratung empfohlen. Der Anwender muss jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des DVS und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe „Thermisches Spritzen und thermisch gespritzte Schichten“

Nachdruck und Kopie, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers

**chemisch und elektrochemisch:**

Chemische Entschichtungsmechanismen basieren auf einer Reaktion mit der Schicht, häufig einer Oxidation. Um eine Beschädigung des Substrates zu vermeiden, müssen die Eigenschaften der eingesetzten Substanzen präzise ausgewählt werden.

**mechanisch:**

Mechanische Mechanismen lassen sich unterteilen in spanabhebende Techniken und Aufpralltechniken. Während die spanabhebenden Verfahren mit einer Schneide das Material abheben, wird bei den Aufpralltechniken durch das stumpfe Auftreffen eines Partikels oder eines Strahls der Schichtzusammenhalt zerstört und die Schicht entfernt.

**thermisch:**

Thermische Mechanismen können in wärmebringende und wärmeentziehende (kältetechnische oder kryogene) Prozesse unterteilt werden. Ziel ist die Nutzung von Spannungen, hervorgerufen durch abweichende Wärmeausdehnung oder temperaturabhängige Änderungen der Materialeigenschaften wie etwa der Kaltversprödung. Wärme kann eingesetzt werden, um eine chemische Reaktion zu beschleunigen, die Schicht zu schwächen, zu schmelzen oder zu verdampfen, dabei ist zu beachten, dass auch eine Schädigung des Substrates möglich ist.

Viele Entschichtungstechniken kombinieren mehrere der genannten Mechanismen. Abrasivstrahl-Techniken etwa wirken auch über den Aufprallmechanismus. Je bedeutender die Unterschiede in den genutzten physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe von Schicht und Substrat sind, um so einfacher kann eine selektive Entschichtung erreicht werden.

Bei den typischen Anwendungen thermisch gespritzter Schichten handelt es sich um metallische, keramische und metallisch-keramische Werkstoffe auf metallischen Substraten. Da die physikalischen Eigenschaften von Metallen untereinander oft in der selben Größenordnung liegen, ist ein selektives Abtragen metallischer Schichten von metallischem Substrat oft schwierig.

Besonderheiten in den Eigenschaften thermisch gespritzter Schichten erleichtern jedoch einen selektiven Abtrag. Diese Besonderheiten sind:

- lamellare Struktur der thermisch gespritzten Schicht,
- teilweises Auftreten von Mikrorissen, initiiert bei der Enttarrung der Spritzpartikel,
- Porositäten der Schicht von je nach Spritzverfahren bis zu 15% Vol.,
- heterogener Aufbau der Schicht,
- anisotroper Aufbau der Schicht.

Dadurch sind die Bindungskräfte innerhalb der Schicht oder zwischen Schicht und Substrat bei vielen Spritzverfahren um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als innerhalb des metallischen Substrats und erlauben daher für einige Verfahren den selektiven Abtrag der Schicht ohne eine Beschädigung des Substrates.

**4 Sicherheit und Umweltschutz**

Für die im folgenden beschriebenen Verfahren sind die allgemeinen und spezifischen Betriebs- bzw. Unfallverhütungsvorschriften (UVV) [1] zu beachten. Gerade im Bereich der handgeführten Verfahren sind die speziellen Schutzmaßnahmen für den Bediener von hoher Bedeutung. Dazu zählen z. B. der Schutz gegen Lärm und Aerosolmissionen. Im Hinblick auf die Aerosole ist dabei zu beachten, dass beim Entschichten die entstehenden Partikelgröße, -lung und -konzentration bzw. -verweilzeit und somit gerade bei gesundheitskritischen Schichtsystemen zu erhöhten Anforderungen an die Schutzausrüstung führen.

Beim Umweltschutz stellen die zur Entsorgung anfallenden Materialien einen bedeutenden Kostenfaktor dar. Je nach eingesetztem Verfahren fallen dabei neben den abgetragenen Schichtwerkstoffen auch Betriebsmittel an, deren Entsorgungskosten

vor allem im Bereich der chemischen Verfahren sehr hoch sein können. In diesem Bereich können Verfahren, die keine oder nur leicht recycelbare Feststoffe bzw. Flüssigkeiten verwenden einen großen ökologischen und damit auch ökonomischen Vorteil bieten.

**5 Entschichtungsverfahren**

Die vorgestellten Verfahren sind in Tabelle 2 mit ihren markantesten Eigenschaften aufgelistet.

**Tabelle 2. Übersicht der Abtragverfahren.**

Verfahren	Eigenschaften
<b>chemische und elektrochemische Verfahren</b>	
– chemisch	– große Verbreitung in der Praxis
– elektrochemisch	– nahezu alle metallischen Werkstoffe, für keramische Werkstoffe nur eingeschränkte Nutzung
– Salzschmelzen	– Entsorgungsproblematik für die Abfallprodukte
<b>mechanische Verfahren</b>	
– Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide:	– insbesondere für Teile mit planen und rotationssymmetrischen Flächen weit verbreitet
– Drehen / Fräsen	– an harten Schichten starker Werkzeugverschleiß
– Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide:	– große Verbreitung in der Praxis
– Schleifen	– hohe Abtragleistungen
– Abrasivstrahlen	– kein selektiver Abtrag möglich
– Hydrmechanisch	– sehr präzise Verfahren
– Wasserabrasivstrahlen	– relativ hohe Investitionskosten
– Hochdruckwasserstrahlen	– Einsatz insbesondere für große Stückzahlen
<b>thermische Verfahren</b>	
– Laserablation	– Prototypverfahren
– kryogene Verfahren	– teilweise noch geringe Abtragraten (Laserablation)
– Flüssigstickstoff-Aufprallstrahlen	– zurzeit auf bestimmte Schichtsysteme beschränkt (insbesondere keramische Werkstoffe)
– Flüssigstickstoffstrahlen	
– Trockeneis- (Laser-)strahlen	

**5.1 Chemische und elektrochemische Verfahren****5.1.1 Chemisch**

Das Abtragprinzip der chemischen Verfahren (siehe DIN 8590-2, [2]) beruht auf einer gezielten Reaktion mit dem Schichtwerkstoff. Dabei wird eine Chemikalie ausgewählt, die mit dem Schichtwerkstoff reagiert, wobei eine Reaktion mit dem Substratwerkstoff nach Möglichkeit auszuschließen ist. Die Wahl einer geeigneten Substanz ist bei metallischen Schichten auf metallischem Substrat oft schwierig. Bei Substratwerkstoffen mit niedrigem Normalpotential wie etwa Aluminium, Magnesium, Zink oder Zinn, die alle ein negatives Normalpotential aufweisen, ist es schwierig geeignete Substanzen zu finden, die den Substratwerkstoff nicht angreifen.

Um die erneute Ablagerung des im Bad gelösten Schichtwerkstoffes zu vermeiden, können auf den Werkstoff abgestimmte Chelatbildner zugegeben werden [3].

Die flüssige Chemikalie kann auf das Werkstück aufgetragen werden, wobei die angegriffene Schicht und die entstehenden Schlämme dann durch abspachteln oder abspülen entfernt wer-