

Lasertechnologie zur Entfernung radioaktiver und chemisch-toxischer Kontaminationen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

A. Anthofer¹, W. Lippmann¹, O. Peise², S. Voss², D. Trimis², A. Hurtado¹

- 1) Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik, Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden / Deutschland
- 2) Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Gustav-Zeuner-Straße 7, 09596 Freiberg / Deutschland

1. Motivation und Einleitung

Nach dem Störfall der Fukushima-Reaktoren am 11. März 2011 wird in Deutschland der Ausstieg aus der Kernenergienutzung forciert, was zum Erlöschen der Betriebsgenehmigungen von acht Kernkraftwerken (KKW) und der geplanten Abschaltung der verbleibenden neun Kernkraftwerke in Deutschland bis zum Jahr 2022 führt. Grundsätzliches Ziel beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage ist die „grüne Wiese“, so dass keine sicht- und messbaren Spuren der Anlage verbleiben.

Zu diesem Zweck werden in einem Druckwasserreaktor (DWR) rund 130.000 Mg [1-2] und in einem Siedewasserreaktor (SWR) rund 300.000 Mg [3] Rückbaumasse zerlegt, dekontaminiert und nachbehandelt sowie ggf. uneingeschränkt freigegeben [1]. Ca. 13.000 Mg Material werden zu diesem Zweck mittels Einsatz von Dekontaminationsmaßnahmen mit dem Ziel der Freigabe behandelt. Etwa 2 bis 3 % der Gesamtrückbaumasse und des Sekundärmüll verbleiben als radioaktiver Abfall [1-3]. Für diese Abschätzung werden als Referenzanlagen die KKW Würgassen (SWR), KKW Stade (DWR) [1] und KKW Mühlheim-Kärlich (DWR) [2] herangezogen. Zur Freigabe der Gebäude werden die ca. 20.000 m² Betonoberfläche begutachtet und gereinigt, wobei neben der radioaktiven auch eine chemisch-toxische Dekontamination erfolgt. Derartige Arbeiten werden in den laufenden Rückbauprojekten durch mechanische Verfahren manuell durchgeführt und durch hohe Kraft zum Andrücken der Dekontaminationswerkzeuge auf das Werkstück, hohe Personendosen und Belastung durch kontaminierten Staub erschwert. Bei der Entschichtung von Betonwänden bewältigt eine Arbeitskraft ca. 1,5 bis 2 m²/h bei einer maximalen Arbeitszeit von 6 h/d [4]. Dieses Vorgehen stößt angesichts der Dimension künftiger Rückbaumassen an technologische und kapazitive Grenzen.

Automatische oder fernhantierte Systeme mit hoher Präzision sind notwendig, um eine Minimierung an radioaktivem und chemisch-toxischem Abfall sowie eine nennenswerte Reduzierung der Expositionszeiten des Personals zu gewährleisten. Eine Möglichkeit zur Durchführung von Dekontaminationsarbeiten stellen Hochleistungslaser dar. Im Vergleich zu bisher eingesetzten konventionellen mechanischen Abtragverfahren bieten das berührungslose Arbeiten, die hohe Präzision und eine staubfreie Oberflächenbearbeitung ohne entstehende Sekundärabfallmengen signifikante Vorteile. Der im Rahmen der fortschreitenden Entwicklung von Hochleistungslasern wesentliche Hauptnutzen liegt darüber hinaus in der einfachen Automatisierbarkeit des laserbasierten Dekontaminationssystems, sowie in der gleichzeitigen Konditionierung durch die Bildung von Schmelzphasen ohne Zerstörung toxischer Chemikalien. An der Technischen Universität Dresden befinden sich Verfahren zur Laserdekontamination sowohl von radioaktiv kontaminierten als auch von chemisch-toxisch kontaminierten Betonstrukturen in Entwicklung.

- **Laserdekontamination von radioaktiv kontaminierten Betonoberflächen:**

Staubfreie Reinigung ohne Rückstellkräfte, sodass die kontaminierte Schicht aufgeschmolzen und die Schmelze abgesaugt wird. Die gleichzeitige Konditionierung der Schmelze erfordert keine weiteren Bearbeitungsschritte für das Endlager; die abgetragenen Stoffe liegen endlagerfertig konditioniert vor. Die Flächenabtragleistung des Systems liegt bei ca. 2,3 m²/h. Bei Versuchen unter realistischen Bedingungen mit kalzitischen, quarzitischen und Mischbetonen mit Zuschlagstoffen von 4 mm bis 16 mm Korngröße konnten Abtragtiefen von 1 bis 5 mm bei einer kontinuierlichen Laserleistung von 10 kW realisiert werden [5].

- **Laserdekontamination von chemisch-toxischen Oberflächenbeschichtungen:**

Hierbei handelt es sich u. a. um Polychlorierte Biphenyle (PCB) sowie kanzerogene chlorierte Kohlenwasserstoffe, die durch Schutzlacke auf Betonstrukturen aufgetragen worden sind. Stand der Technik ist derzeit ein manuelles Abtragen der Lacke und eine Nachbehandlung in einer Sondermüllverbrennungsanlage. Die hier vorgestellte Entwicklung beinhaltet den Einsatz von Lasertechnologie, bei der Temperaturen oberhalb von 1200 °C im Laserspot erzielt werden und infolgedessen die chemisch-toxischen Komponenten thermisch zerstört werden. Durch geeignete Abgasführung werden die Rekombination und Bildung toxischer Folgestoffe wie Polychlorierter Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) vermieden. Die Flächenabtragleistung des Systems erreicht ca. 13 m²/h bei einer kontinuierlichen Laserleistung von 10 kW.

Das Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg, entwickelt ein Verfahren, welches mittels Laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) die thermochemische Umsetzung der toxischen Substanzen nachweist. Dies ermöglicht die Optimierung der für die Laserdekontamination wichtigen Prozessparameter, wie beispielsweise Leistung, Vorschub und Anstellwinkel und gewährleistet die Schadstofffreiheit der Abgase. Ziel ist es, eine sehr hohe Effizienz bei der Behandlung von radioaktiv sowie chemisch-toxisch kontaminierten Oberflächen zu erreichen.

Beide Anwendungen der Lasertechnologie bieten eine einfache Automatisierung sowie einen präzisen Abtrag der kontaminierten Flächen und sind nacheinander an mehreren Anlagen in künftigen Rückbauprojekten einsetzbar. Hocheffiziente Lichtleitkabel erlauben eine Positionierung des Lasers über 100 m vom Ort der Dekontaminationsarbeit entfernt, um diesen nicht zu kontaminieren.

2. Dekontamination von radioaktiv kontaminierten Betonoberflächen mittels Lasertechnologie

Die Forschung der manipulatorgestützten Oberflächenentschichtung mittels Lasertechnologie basiert auf vorhergehenden Projekten zur Laser-Oberflächenablation bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung [6-8], die mit einem kontinuierlich arbeitenden Diodenlaser der Leistung 3 kW mit Wellenlängen von 808 nm und 940 nm durchgeführt wurden. In diesem Beitrag vorgestellte Ergebnisse resultieren aus einer Oberflächenentschichtung mittels eines kontinuierlich arbeitenden Diodenlasers mit einer Leistung von 10 kW bei gleichmäßiger Energieverteilung der überlagerten Wellenlängen 915 nm, 940 nm, 980 nm und 1030 nm. Für einen operativen Einsatz ist ein Laserarbeitskopf entwickelt worden, der auf einem vom Karlsruher Institute of Technology (KIT) entwickelten Manipulator selbsttätig Betonoberflächen in Kernkraftwerken dekontaminieren kann. Der mit dem Laser-Arbeitskopf bestückte Manipulator ist in Abbildung 1 beim Abfahren einer Teststrecke an einer Wand dargestellt. Die Saugteller (Pos. 4 in Abbildung 1) am Außen- und Innengerüst des Manipulators ermöglichen ein unkompliziertes Umsetzen und Drehen an der Wand. Ein verfahrbarer Teleskoparm, an dem der Laserarbeitskopf

befestigt ist, ermöglicht kleine Versatzstrecken ohne ein Umsetzen des Hauptmoduls. In der Sensoren-Box (Pos. 2 in Abbildung 1) sind Distanz- und Oberflächensensoren untergebracht, die eine Kollision des Arbeitskopfes mit Hindernissen und ein Überfahren von Wandsdurchbrüchen oder Unebenheiten vermeiden.

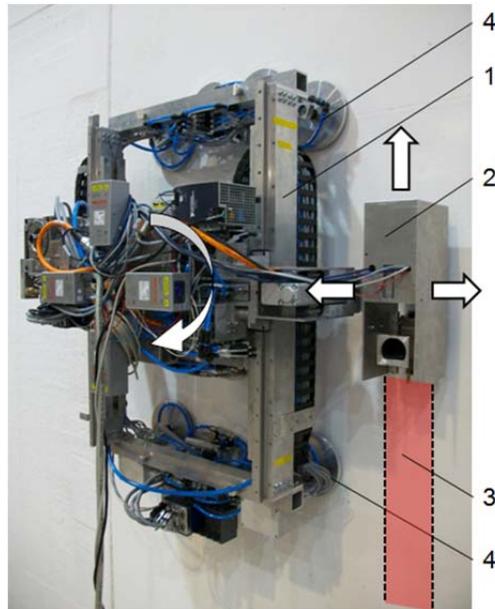


Abbildung 1: KIT-Manipulator mit TUD-Laser-Arbeitskopf (1 = Trägermodul, 2 = Sensoren-Box, 3 = entschichtete Spur, 4 = Saugplatten) [9]

Die Funktionsweise des Laserarbeitskopfes ist in Abbildung 2 dargestellt. Eine Laseroptik homogenisiert den runden Laserstrahl auf eine rechteckige Fläche von $45 \times 10 \text{ mm}^2$ und gewährleistet eine gleichmäßige Energieverteilung auf der Betonoberfläche. Ausblasdüsen tragen den geschmolzenen Beton aus dem Schmelzbad ab und führen ihn der Absaugung zu. Die geschmolzenen Partikel erstarren und liegen im Absaugkanal in verglasteter Form vor, die die radioaktive Kontamination einschließen [6-8].

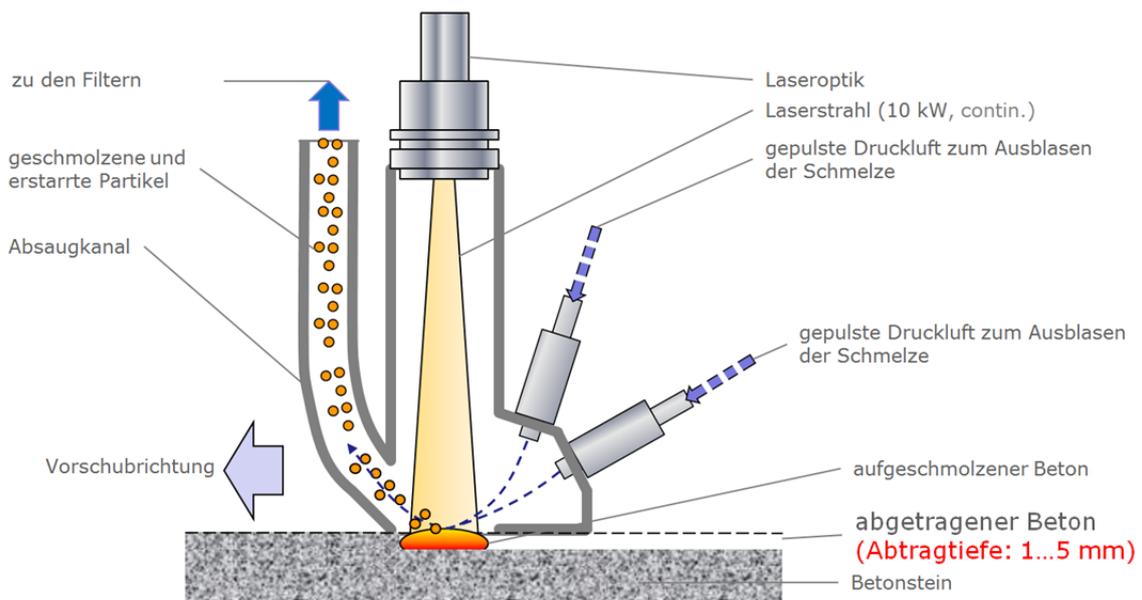
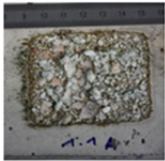
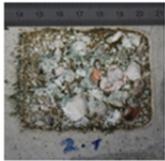
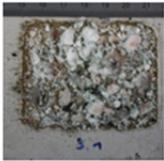
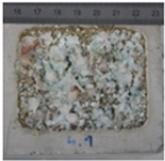
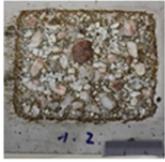
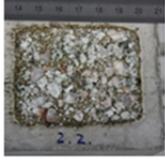
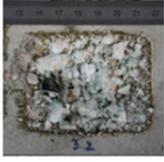
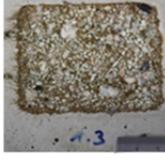
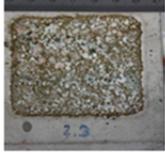
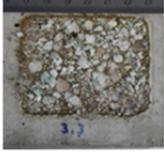
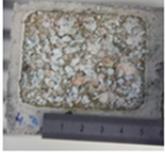
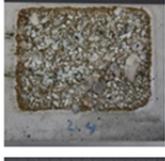
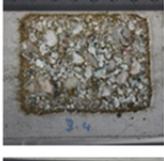
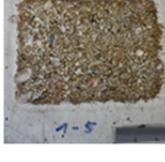
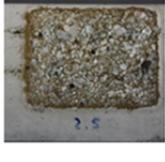
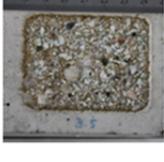


Abbildung 2: Funktion des Laser-Arbeitskopfes zur Beton-Oberflächendekontamination [9]

Parametervariationen ergaben eine Flächenabtragsleistung von bis zu 2,16 m²/h bei realisierten Abtragtiefen von 1 – 5 mm entsprechend der Laserleistung. Tabelle 1 zeigt die makroskopische Oberflächenanalyse mittels Laser entschichteter Oberflächen nach verschiedenen Leistungs- und Vorschubgeschwindigkeitstests. Die Oberflächen der Versuche mit einer Laserleistung von 8 kW und 10 kW mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min und 400 mm/min weisen einen zu hohen Energieeintrag auf, um den geschmolzene Beton durch die Ausblasdüsen abzutragen. In diesen Fällen verbleibt Restschmelze in der Abtragzone. Die Leistungs-Klasse von 10 kW ist für Vorschubgeschwindigkeiten von 600 mm/min bis 1000 mm/min geeignet. So ergeben sich bei 10 kW gut entschichtete Oberflächen für 1000 mm/min und für 800 mm/min durch eine makroskopische Analyse. Die Abtragtiefen betragen dabei 4-5 mm. Die entschichteten Gebiete der Messreihen 4 kW bei 400 mm/min, 600 mm/min und 800 mm/min, 6 kW, 8 kW und 10 kW bei 600 mm/min bis 1000 mm/min weisen eine sehr gute Oberflächenqualität in der Abtragzone auf.

Auf der anderen Seite liefern niedrige Laserleistungen von 4 kW und hohe Vorschubgeschwindigkeiten (800 mm/min und 1000 mm/min) sehr geringe Abtragtiefen von ca. 1 mm oder geringer. Der Hintergrund ist eine Oberflächentemperatur tiefer als die Schmelztemperatur des Betons von 1500 °C [10] während des Abtrags, sodass eine Ablation einer kleinen Schicht durch Thermospannung resultiert.

Tabelle 1: Makroskopische Oberflächenanalyse entschichteter Betonoberflächen [5]

	4 kW	6 kW	8 kW	10 kW
200 mm/min				
400 mm/min				
600 mm/min				
800 mm/min				
1000 mm/min				

In Abbildung 3 werden die erzielten Abtragtiefen für verschiedene Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt. Die Intervalle der Ergebnisse kommen durch die Ablation von Zuschlagstoffen zustande, die durch Thermospannung und Entgasung aus der Betonmatrix gelöst werden. Anhand dieser Daten kann die durch die Kontaminationstiefe geforderte Abtragtiefe realisiert werden.

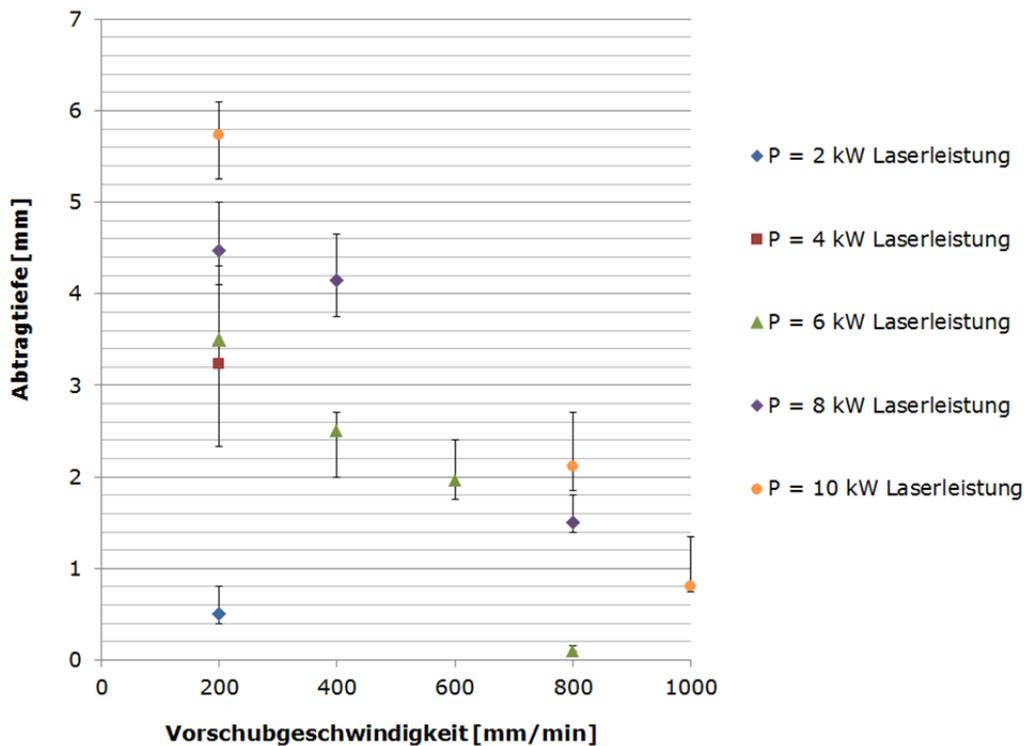


Abbildung 3: Abtragtiefen in Relation zu Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit

Eine Untersuchung der bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Leistungen entschichteten Betonproben ergibt, dass durch eine Optimierung der Ausblasdüsen des Laserarbeitskopfes höhere Abtragtiefen für die Parameter 8 kW und 10 kW bei Vorschüben von 200 mm/min und 400 mm/min erzielt werden können. Eine höhere Abtragtiefe ist möglich, die große Masse an Schmelze muss aber kontrolliert durch die Düsen ausgeblasen werden können.

3. Dekontamination von chemisch-toxisch kontaminierten Betonoberflächen mittels Lasertechnologie

Polychlorierte Biphenyle (PCB) wurden lange Zeit als Weichmacher in Lacken verwendet und so auch als Dekontaminationslacke in kerntechnischen Anlagen eingesetzt. Nachdem die Umweltrelevanz von PCB erkannt worden ist, haben die Firmen Monsanto A. G. und Bayer A. G. die Produktion in den Jahren 1977 bzw. 1983 eingestellt. Mit der PCB-Verordnung vom 18. Juli 1989 wurden Herstellung, Inverkehrbringung und Verwendung von PCB verboten [11].

Zum Schutz der Betonstrukturen vor radioaktiver Kontamination befinden sich diese Lacke an nahezu allen Innenwänden eines Kernkraftwerkes und dehnen sich so über eine Fläche von ca. 20.000 m² pro Anlage aus. Die Lackdicken variieren dabei zwischen 1,5 und 3 mm aufgrund ihrer unterschiedlichen Verwendung an Wänden oder an Decken und Böden, aber auch aufgrund von Nachlackierungen. Generell lässt sich keine Aussage über einheitliche Schichtdicken der Lacke treffen.

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen werden die PCB-haltigen Lacke im Rahmen des Ziels "Grüne Wiese", d.h. vollständiger Abbau der Anlage, entfernt und entsorgt. Bei den bisherigen Rückbaumaßnahmen geschah dies über

mechanische Abtragverfahren mit dem Nachteil der Staubfreisetzung und damit resultierender Sekundärkontamination.

Durch den Einsatz eines Diodenlasers mit 10 kW kontinuierlicher Leistung und Wellenlängen von 915 nm, 940 nm, 980 nm und 1030 nm soll dieses Abtragverfahren der Lacke an den Betonoberflächen optimiert werden. Ziel ist es, in einem Prozessschritt die Lackschichten abzutragen, die PCB zu zersetzen und die Produktion und Freisetzung von Giftstoffen zu vermeiden. Daher ist bekannt, dass zur Zersetzung der PCB Temperaturen von $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ erforderlich sind, um die direkte Bildung von PCDD/F zu vermeiden [12-14]. Bei einem Wiederabkühlen des Rauchgases entstehen durch Rekombinationen im Bereich von $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ PCDD/F nach dem Modell der De-novo-Synthese [14].

Auf der Basis der theoretischen Kenntnisse von PCB wird in dieser Arbeit eine Versuchsanlage konzipiert. Das realisierte Dreibarrierensystem zum Rückhalt toxischer Stoffe ist in Abbildung 4 dargestellt. Die äußerste Barriere besteht aus einem Containment (3 in Abbildung 4), in dem die Versuchsapparaturen unterkommen. Ein Filtersystem ermöglicht Frischluftzufuhr im Inneren und gewährleistet durch einen Feinstaub-Gas-Kombifilter einen Rückhalt toxischer Stoffe. Im Inneren findet die Laser-Box (2 in Abbildung 4) als zweite Barriere Platz, die den Laser-Arbeitskopf (VORATOR) (1 in Abbildung 4) als innerste Barriere integriert. Das LIF-System ist seitlich angeordnet. Über die Fenster der Arbeits-Box und des VORATORs ist eine Beobachtung des Prozesses über die Monitoring-Kamera möglich.

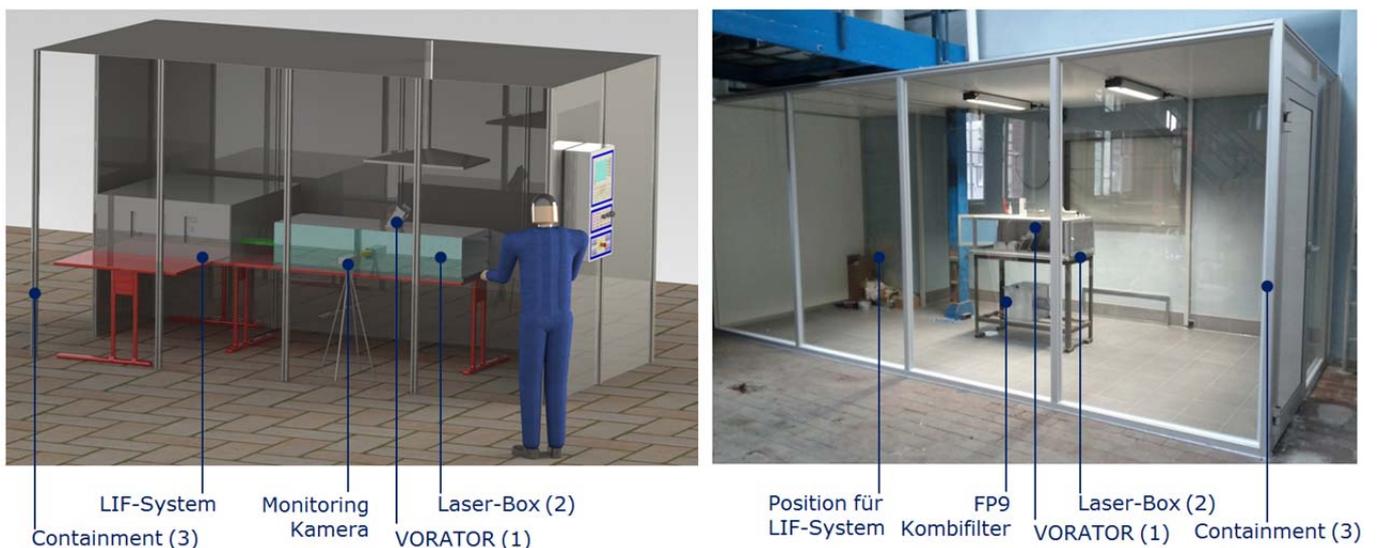


Abbildung 4: Dreibarrierenkonzept zum Rückhalt chemisch-toxischer Stoffe

Äquivalent zu den Forschungen zum Abtrag radioaktiv kontaminierter Betonschichten wird mittels einer Homogenisierungsoptik ein Rechtecklaserspot von $45 \times 10\text{ mm}^2$ erzeugt. Eine Lineareinheit in der Laser-Box verfährt die lackierten Betonproben unter dem VORATOR.

In Abbildung 5 ist schematisch der Prozess der Laserdekontamination chemisch-toxischer Schichten dargestellt. Abgebildet ist der VORATOR, der den Laserstrahl umhüllt. Zur Beobachtung des Dekontaminationsprozesses mittels der Monitoring Kamera und einer Highspeed-Kamera sind synthetische Quarzglascheiben am VORATOR angebracht. Zuluftdüsen an der Oberseite stellen die stöchiometrischen Bedingungen im VORATOR sicher und blasen die Scheiben frei. Im Oxidationsbereich werden Temperaturen von 800 bis $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ an der Oberfläche des lackierten Betonsteins mittels Laser realisiert, im Rekombinationsbereich wird das Rauchgas gekühlt.

Eine Absaugvorrichtung verwirbelt die warmen Prozessgase mit der Umgebungsluft und führt so ein thermisches Quenching unter $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ herbei. In diesem Absaugkanal befinden sich Thermoelemente zur Überwachung des

Temperaturniveaus des Rauchgases. Anschließend wird das Rauchgas über einen Gas-Feinstaub-Kombifilter geführt.

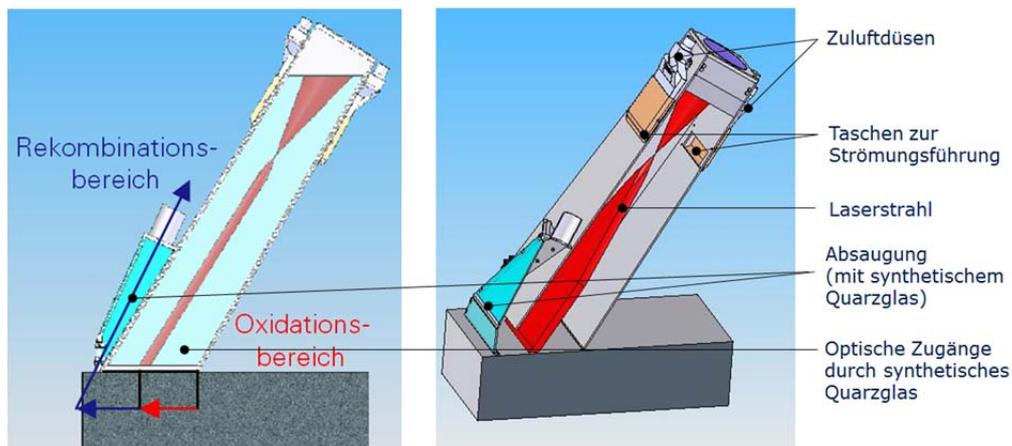
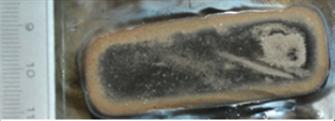
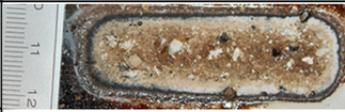
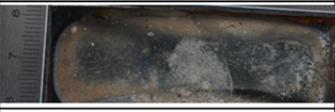
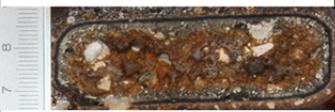


Abbildung 5: Schema der Dekontamination einer lackierten Betonoberfläche; links: Seitenansicht des VORATORS und Einteilung in die Oxidations- und Rekombinationsbereiche; rechts: perspektivischer Schnitt durch den VORATOR

Versuche zum Laserentschichten von mit Epoxidharzlack beschichteten kalzitischen, quarzitischen und Misch-Betonproben (Mischung 1:1 quarzitisch / kalzitisch) ermöglichen eine Optimierung des Dekontaminationsprozesses ohne das hohe Gefahreninventar PCB-haltiger Proben. In Tabelle 2 sind die Oberflächen von entschichteten Betonproben dargestellt. In der dargestellten Versuchsreihe wurde die lackierte Oberfläche mit definierter Leistung von 8 kW und Dauer (200 ms – 2000 ms) bestrahlt, um die Wechselwirkung von Laser mit Beton und Lack zu beobachten.

Tabelle 2: Von Epoxidharzlack mit 8 kW Laserleistung entschichtete Betonoberflächen

Zeit	Calzitischer Beton	Quarzitischer Beton	Mischbeton
200 ms	/		
400 ms	/	/	
500 ms			
1000 ms			
2000 ms	/		

Bei einer Bestrahlungsdauer von 200 ms wird eine dünne Schicht des Lackes entfernt. 400 ms ermöglichen eine gute Entschichtung des Lackes, hier dargestellt am Beispiel eines Mischbetonsteines. Reste von Lack sind auf der abgetragenen Fläche jedoch noch vorhanden. Bei einer Leistung von 8 kW und einer Bestrahlungszeit von 500 ms erfolgt eine vollständige Entschichtung des Lackes im Bereich des Laserspots auf der Fläche von 45 x 10 mm² und die Betonoberfläche ist noch intakt. Nach einer Bestrahlungszeit von 1000 ms bei 8 kW Laserleistung wird der Beton mit abgetragen. Bei kalzitischem Beton werden Segmente durch Thermospannung und Entgasung aus der Betonmatrix gelöst, bei quarzitischem Beton wird die Oberfläche der Betonprobe geschmolzen. Mischbeton weist bei einer Bestrahlzeit von 1000 ms beide Effekte auf. Eine längere Bestrahlungszeit trägt lediglich zu einem höheren Abtrag der Betonmatrix bei.

Eine Temperaturmessung mittels Thermoelementen im Abgaskanal lässt eine Einschätzung möglicher PCDD/F-Bildung in der Rekombinationszone des Arbeitskopfes zu. Die Messstelle T1 befindet sich am Beginn des Absaugkanals, die Messstelle T2 am oberen Ende und T3 im Absaugschlauch (siehe Abbildung 6). Die Ergebnisse der Temperaturmessung sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Versuche der Bestrahlungszeit von 200 ms und 300 ms werden hier nicht berücksichtigt, da keine Verbrennung bzw. Entschichtung zustande kam und eine Temperaturschätzung zufällig ist.

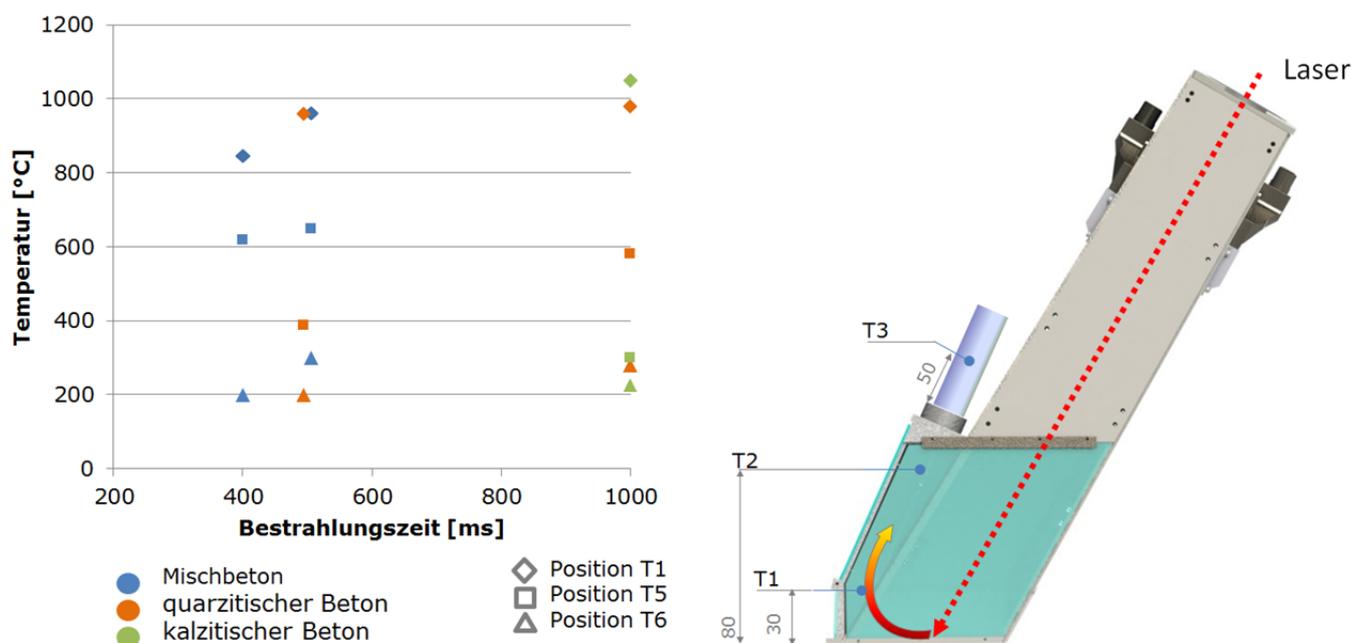


Abbildung 6: links: Temperaturen an den Thermoelementpositionen T1 bis T3 für verschiedene Bestrahlzeiten bei einer Laserleistung von 8 kW für quarzitisches, kalzitisches und Mischbeton; rechts: Position der Thermoelemente T1 bis T3 im Absaugkanal des VORATOR

Die Auswertung der Temperaturmessung der Versuche mit den Bestrahlzeiten 400 ms, 500 ms und 1000 ms zeigen, dass das thermische Quenching erfolgt; Für Mischbeton bei einer Bestrahlzeit von 500 ms ergeben sich ca. 300 °C, bei den restlichen Versuchen wurde durchgehend auf unter 250 °C gequenchet. Die von den Thermoelementen erfassten Temperaturen stimmen für die unterschiedlichen Betonproben überein. Die Lackentschichtung mittels Lasertechnologie ist – solange nur der an der Oberfläche befindliche Lack abgetragen wird – unabhängig von der Zusammensetzung des Untergrundbetons und dessen Entgasung.

Laufende Versuchsreihen tragen zur Optimierung des Dekontaminationsprozesses bei und ermöglichen die Planung und Durchführung gezielter Versuche mit PCB-haltigen Lacken. Hierfür wird parallel, dem Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg ein Verfahren zum Echtzeitmonitoring der thermochemischen Zersetzung der toxischen chlorierten Bestandteile entwickelt. Mittels laserinduzierter

Fluoreszenz soll dabei die Konzentration des CCl- Radikals zeitlich und örtlich aufgelöst in der Flammenfront gemessen werden. Dieses Radikal dient als Abbaukriterium hochmolekularer chlorierter Verbindungen wie der PCB. Korrelationen zwischen der Radikalkonzentration und tatsächlicher gemessener Emissionen an chlorierten Verbindungen sollen dann der Echtzeitoptimierung des Laserabtragverfahrens dienen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Dekontaminationsarbeiten mittels Lasertechnologie können essentiell durch Vermeidung von Sekundärkontamination und Abtrag nicht kontaminierter Massen zu einer Reduktion radioaktiver Abfälle und von Sondermüll beim Rückbau kerntechnischer Anlagen führen. Durch seine hohe Genauigkeit, der einfachen Automatisierbarkeit, berührungslosem und staubfreiem Arbeiten und der Kombination mehrerer Prozessschritte verfügt die Oberflächenreinigung durch Lasertechnologie über ein großes Potential. Für die Entschichtung radioaktiv kontaminierter Betonoberflächen ist ein definierter Abtrag bei gleichzeitiger Konditionierung der Abprodukte über eine Verglasung der radioaktiven Stoffe mittels Lasertechnologie entwickelt worden. Der Einsatz dieser Technologie trägt zur Minimierung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle bei sowie der Personendosisleistung des Rückbaupersonals. Das Arbeiten ohne Staubproduktion und Rückstellkräfte reduziert die Gefahr der Kontaminationsverschleppung und der Inkorporation.

Für den Abtrag von Lackschichten ist eine gleichzeitige Zersetzung toxischer Komponenten zu validieren. Das LIF-Messsystem gewährleistet dabei Nachweisführung. Die durchgeführten Versuchsreihen mit Epoxidharzlack lassen eine Optimierung des Prozesses zu und ermöglichen die Planung und Durchführung sicherer Entschichtungsversuche mit PCB-haltigen Lacken durch Lasertechnologie.

5. Abkürzungen

DWR	Druckwasserreaktor
KKW	Kernkraftwerk
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und –Furane
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
SWR	Siedewasserreaktor

6. Literaturverzeichnis

- [1] E.ON Kernkraft GmbH, Stade – Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks – vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“, Hannover, Germany 2008
- [2] RWE Power AG, Anlage Mülheim-Kärlich – ein Kernkraftwerk im Rückbau, Mülheim-Kärlich, Germany

- [3] E.ON Kernkraft GmbH, Vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“ – Stilllegung und Rückbau des Kernkraftwerks Würgassen, Hannover, Germany 2008
- [4] Thierfeldt, S., Schartmann, F., Brenk Systemplanung, BMBF, Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, 3. Auflage, Aachen 2011
- [5] Anthofer, A., Lippmann, W., Hurtado, A., Development and Testing of a Laser-Based Decontamination System Optics & Laser Technology, J. of Optics & Laser Technology, in press, 2012
- [6] Herrmann, M., Lippmann, W., Zeuner, A., Hurtado, A., 2009, Dekontamination silikatischer Oberflächen mittels Laserabtrag bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung, Jahrestagung Kerntechnik, Dresden, Germany, 2009
- [7] Herrmann, M., Lippmann, W., Hurtado, A., 2009, The Release of Radionuclides in the Laser Decontamination Process, 17th ICONE, Brussels, Belgium, 2009
- [8] Knorr, J., Dekontamination silikatischer Oberflächen in kerntechnischen Anlagen mittels Laserabtrag bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung, Abschlussbericht, TIB UB, Signatur F07B849, Dresden, Germany 2006
- [9] Lippmann, W., Anthofer, A., Littwin, R., Hurtado, A., Development of a Manipulator-Supported Laser Decontamination System, 20th ICONE, Anaheim, USA 2012
- [10] Schneider, U., Diederichs, U., Physikalische Eigenschaften von Beton von 20 °C bis zum Schmelzen, Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 4/81, Paris, France 1981
- [11] Verordnung zum Verbot von polychlorierten Biphenylen, polychlorierten Terphenylen und zur Beschränkung von Vinylchlorid (PCB-, PCT, VC-Verbotsverordnung), Bundesanzeiger Nr. 38, Bonn, Germany, 1989
- [12] Khatchatryan, L., Asatryan, R., Dellinger, B., Chemosphere, 52 (2003), pp. 695–708
- [13] Sidhu, S. S., Maqsood, L., Dellinger, B., Mascolo, G., J. of Combust. Flame 100 (1995), pp. 11–20
- [14] Stanmore, B. R., The formation of dioxins in combustion systems, J. of Combustion and Flame 136 (2004), pp. 398–427