

Institut für Energietechnik
Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Antonio Hurtado

Abschlussbericht

MANipulator gesteuerter Oberflächenabtrag durch Lasertechnologie (MANOLA)

Gesamtlaufzeit des Projektes:
01.07.2008 – 30.09.2011

Förderkennzeichen: 02S8558

Projektleiter:	Antonio Hurtado
verantwortliche Bearbeiter:	René Littwin Wolfgang Lippmann

Dresden, November 2011

Hinweis:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt beim Autor.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel MANipulator gesteuerter <u>O</u>berflächenabtrag durch <u>L</u>asertechnologie (MANOLA)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Littwin, René Hurtado, Antonio Lippmann, Wolfgang	5. Abschlussdatum des Vorhabens September 2011
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Technischer Fachbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Dresden Institut für Energietechnik Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik 01062 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 02S8558
	11. Seitenzahl 69
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 21
	14. Tabellen 12
	15. Abbildungen 36
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Ziel des in diesem Abschlussbericht beschriebenen Vorhabens ist die Entwicklung eines manipulatorgesteuerten Systems zum lasertechnischen Abtrag von radioaktiv belasteten Betonoberflächen. Hierfür wurden die Kompetenzen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Bereich der Manipulortechnik mit den Kompetenzen der TU Dresden (TUD) auf dem Gebiet des Laserabtrags von Oberflächen zusammengeführt. Der vorliegende Bericht umfasst den von der TU Dresden bearbeiteten Teil des Verbundprojektes. Ausgehend von einer Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes im Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen in Deutschland und Europa, werden die zurzeit dafür eingesetzten Technologien vorgestellt und vergleichend bewertet. Daraus ergeben sich die spezifischen Anforderungen an die entwickelte Laserdekontaminationstechnologie und an deren technische Umsetzung in Kombination mit dem autarken Geräteträgersystem des KIT. Unter Nutzung der im abgeschlossenen Forschungsprojekt LASABA-II (FKZ: 02S8356) gewonnenen Ergebnisse zum optimierten Laserabtrag von Betonoberflächen, konnte die Technologie so weiterentwickelt werden, dass sie die Anforderungen eines manipulatorgetragenen Einsatzes erfüllt. Dazu wurde der Laserbearbeitungskopf mit einem System von Sensoren ausgerüstet, das im Datenaustausch mit dem Manipulator einen störungsfreien Betrieb des Gerätesystems unter industriellen Bedingungen ermöglicht. Darüber hinaus konnte die Leistungsfähigkeit des Dekontaminationsgerätes gegenüber dem Stand, wie er in LASABA-II beschrieben wurde, noch einmal erhöht werden, indem die Abtragseinheit auf die Laserparameter des jetzt zur Verfügung stehenden Diodenlasers mit 10 kW Strahlleistung ausgelegt wurde. Die Funktionsfähigkeit der neu entwickelten Komponenten wurde in mehreren Versuchsreihen nachgewiesen. Diese beinhalteten unter anderem Tests mit in realen Kraftwerksanlagen zu erwartenden Oberflächenhindernissen, wie Metallbolzen, Schrauben unterschiedlicher Größe, Kantenvorsprünge und Hinterschneidungen. Im Ergebnis der Experimente konnte gezeigt werden, dass kleinere Hindernisse aus Metall vom Laserstrahl abgetragen werden und dass größere, nicht mehr abtragbare Hindernisse von den Sensoren erkannt werden, wodurch das System sie umfahren kann. Desweiteren wurde analysiert, bis in welche Tiefe thermisch induzierte Auswirkungen des Laserabtrags auf die verbleibende Beton-Bewehrungs-Struktur zu erwarten sind. Dazu wurden unter anderem in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen E.ON Kernkraft Betonproben aus dem sich im Rückbau befindenden Kernkraftwerk Würgassen genutzt. Zum Nachweis der Funktionalität des Gesamtsystems wurden abschließend an der TU Dresden Tests unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt. Dazu wurde eine Testwand errichtet, an der sich der Manipulator mit dem angeschlossenen Laserbearbeitungskopf frei bewegen konnte. Gemeinsam mit dem Projektpartner, der das neuentwickelte Manipulatorsystem bereitstellte, wurde der Laserabtrag einer Betonwand in mehreren Demonstrationsexperimenten vorgeführt. Insgesamt haben die Einzelexperimente und die abschließenden Integralversuche gezeigt, dass das neu entwickelte Gesamtkonzept einer manipulatorgetragenen Laser-Dekontamination für einen Einsatz unter den Bedingungen einer Nuklearanlage geeignet ist.	
19. Schlagwörter Kernenergie, Kernkraftwerke, Rückbau, Dekontamination, Lasertechnologie, Manipulator	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Report	
3. title Manipulator-Deployed Laser Decontamination System (MANOLA)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Littwin, René Hurtado, Antonio Lippmann, Wolfgang	5. end of project September 2011	
	6. publication date	
	7. form of publication Technical report	
8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Dresden Institut für Energietechnik Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik 01062 Dresden	9. originator's report no.	
	10. reference no. 02S8558	
	11. no. of pages 69	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 21	
	14. no. of tables 12	
	15. no. of figures 36	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Project aim is the development of a manipulator-deployed system using laser technology to ablate radioactive concrete surfaces. Manipulator technology competences of Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and competences of TU Dresden (TUD) using laser technology for the ablation of surfaces were successfully combined. The report presents the results that were accomplished at TU Dresden. In the first part, the state of development in decommissioning of nuclear facilities in Germany and Europe is presented and technologies commonly used are being identified and compared. So requirements have been derived from this data base to be fulfilled by the laser decontamination technology and the carrier system. Using the results of the research project LASABA II (FKZ: 02S8356, completed in 2008) for optimized laser ablation of concrete surfaces, the technology has been further developed in order to use it as a fully remote controlled device in combination with a manipulator as carrier system. Therefore, the laser ablation unit was equipped with a sensor system developed within this project. Together with the manipulator the latter serves as a basis for the system to be used under industrial conditions. The performance of the laser decontamination system was increased by adapting it to an enhanced diode laser with 10 kW laser power recently put into operation at TU Dresden. The performance of the single components was analysed and verified in several experiments. This includes tests with obstacles of different shapes and sizes occurring in real nuclear power plants like metal bolts, screws and edges. The experiments show that small metal parts are ablated by the laser decontamination system, while bigger parts, which would otherwise damage the system, are detected by the sensors. Thereby, the system is able to avoid these big metal parts. In cooperation with E.ON Kernkraft, concrete samples from the nuclear power plant in Würgassen were used to show that the developed system can be used for the type of concrete commonly used in reactors. The functionality of the combined system (manipulator unit created by KIT and laser unit created by TU Dresden) was finally demonstrated under realistic conditions at TU Dresden in collaboration with KIT. The system could freely be moved and operated via remote control on a vertical test wall, which was specifically designed for purpose of this experiment. The laser ablation on a concrete surface could be successfully demonstrated in several experiments of laboratory scale under conditions typical for nuclear power plants. Given these results, it can be concluded that the system is technologically applicable in upcoming decommissioning projects and that the project aim has been achieved.		
19. keywords Nuclear Energy, Nuclear Power Plants, Decommissioning, Decontamination, Laser Technology, Manipulator		
20. publisher	21. price	

Kurzfassung

Ziel des in diesem Abschlussbericht beschriebenen Vorhabens ist die Entwicklung eines manipulatorgesteuerten Systems zum lasertechnischen Abtrag von radioaktiv belasteten Betonoberflächen. Hierfür wurden die Kompetenzen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Bereich der Manipulatortechnik mit den Kompetenzen der TU Dresden (TUD) auf dem Gebiet des Laserabtrags von Oberflächen zusammengeführt.

Der vorliegende Bericht umfasst den von der TU Dresden bearbeiteten Teil des Verbundprojektes.

Ausgehend von einer Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes im Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen in Deutschland und Europa, werden die zurzeit dafür eingesetzten Technologien vorgestellt und vergleichend bewertet. Daraus ergeben sich die spezifischen Anforderungen an die entwickelte Laserdekontaminationstechnologie und an deren technische Umsetzung in Kombination mit dem autarken Geräteträgersystem des KIT. Unter Nutzung der im abgeschlossenen Forschungsprojekt LASABA-II (FKZ: 02S8356) gewonnenen Ergebnisse zum optimierten Laserabtrag von Betonoberflächen, konnte die Technologie so weiterentwickelt werden, dass sie die Anforderungen eines manipulatorgetragenen Einsatzes erfüllt. Dazu wurde der Laserbearbeitungskopf mit einem System von Sensoren ausgerüstet, das im Datenaustausch mit dem Manipulator einen störungsfreien Betrieb des Gerätesystems unter industriellen Bedingungen ermöglicht.

Darüber hinaus konnte die Leistungsfähigkeit des Dekontaminationsgerätes gegenüber dem Stand, wie er in LASABA-II beschrieben wurde, noch einmal erhöht werden, indem die Abtragseinheit auf die Laserparameter des jetzt zur Verfügung stehenden Diodenlasers mit 10 kW Strahlleistung ausgelegt wurde.

Die Funktionsfähigkeit der neu entwickelten Komponenten wurde in mehreren Versuchsreihen nachgewiesen. Diese beinhalteten unter anderem Tests mit in realen Kraftwerksanlagen zu erwartenden Oberflächenhindernissen, wie Metallbolzen, Schrauben unterschiedlicher Größe, Kantenvorsprünge und Hinterschneidungen. Im Ergebnis der Experimente konnte gezeigt werden, dass kleinere Hindernisse aus Metall vom Laserstrahl abgetragen werden und dass größere, nicht mehr abtragbare Hindernisse von den Sensoren erkannt werden, wodurch das System sie umfahren kann. Desweiteren wurde analysiert, bis in welche Tiefe thermisch induzierte Auswirkungen des Laserabtrags auf die verbleibende Beton-Bewehrungs-Struktur zu erwarten sind. Dazu wurden unter anderem in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen E.ON Kernkraft Betonproben aus dem sich im Rückbau befindenden Kernkraftwerk Würgassen genutzt.

Zum Nachweis der Funktionalität des Gesamtsystems wurden abschließend an der TU Dresden Tests unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt. Dazu wurde eine Testwand errichtet, an der sich der Manipulator mit dem angeschlossenen Laserbearbeitungskopf frei bewegen konnte. Gemeinsam mit dem Projektpartner, der das neuentwickelte Manipulatorsystem bereitstellte, wurde der Laserabtrag einer Betonwand in mehreren Demonstrationsexperimenten vorgeführt.

Insgesamt haben die Einzelexperimente und die abschließenden Integralversuche gezeigt, dass das neu entwickelte Gesamtkonzept einer manipulatorgetragenen Laser-Dekontamination für einen Einsatz unter den Bedingungen einer Nuklearanlage geeignet ist.

Abstract

Project aim is the development of a manipulator-deployed system using laser technology to ablate radioactive concrete surfaces. Manipulator technology competences of Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and competences of TU Dresden (TUD) using laser technology for the ablation of surfaces were successfully combined.

The report presents the results that were accomplished at TU Dresden.

In the first part, the state of development in decommissioning of nuclear facilities in Germany and Europe is presented and technologies commonly used are being identified and compared. Based on this, requirements to be fulfilled by the laser decontamination technology and the carrier system are being derived. Using the results of the research project LASABA II (FKZ: 02S8356, completed in 2008) for optimized laser ablation of concrete surfaces, the technology has been further developed in order to use it as a fully remote controlled device in combination with a manipulator as carrier system. Therefore, the laser ablation unit was equipped with a sensor system developed within this project. Together with the manipulator the latter serves as a basis for the system to be used under industrial conditions.

The performance of the laser decontamination system was increased by adapting it to an enhanced diode laser with 10 kW laser power recently put into operation at TU Dresden.

The performance of the single components was analysed and verified in several experiments. This includes tests with obstacles of different shapes and sizes occurring in real nuclear power plants like metal bolts, screws and edges. The experiments show that small metal parts are ablated by the laser decontamination system, while bigger parts, which would otherwise damage the system, are detected by the sensors. Thereby, the system is able to avoid these big metal parts. In cooperation with E.ON Kernkraft, concrete samples from the nuclear power plant in Würgassen were used to show that the developed system can be used for the type of concrete commonly used in reactors.

The functionality of the combined system (manipulator unit created by KIT and laser unit created by TU Dresden) was finally demonstrated under realistic conditions at TU Dresden in collaboration with KIT. The system could freely be moved and operated via remote control on a vertical test wall, which was specifically designed for purpose of this experiment. The laser ablation on a concrete surface could be successfully demonstrated in several experiments of laboratory scale under conditions typical for nuclear power plants. Given these results, it can be concluded that the system is technologically applicable in upcoming decommissioning projects and that the project aim has been achieved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	9
Inhaltsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	13
Abbildungsverzeichnis	15
1. Einleitung und Zielstellung	17
2. Rückbau kerntechnischer Anlagen	19
2.1. Varianten des Rückbaus	19
2.2. Rückbau in Deutschland	21
2.3. Verfahren zum Rückbau kerntechnischer Anlagen	25
2.3.1. Mechanische und hydraulische Dekontaminationsverfahren	25
2.3.2. Thermische Dekontaminationsverfahren	28
2.3.3. Chemische Dekontaminationsverfahren	29
2.3.4. Thermische Zerlegeverfahren	29
2.3.5. Mechanische Zerlegeverfahren	31
2.4. Vergleich zwischen konventionellen Verfahren und Laser-Dekontamination	33
3. Definition der Anforderungen an die Laser-Dekontamination	35
3.1. Technische Anforderungen an den Laser-Arbeitskopf	35
3.2. Aufgaben des Sensorsystems	36
3.3. Schnittstellen zwischen Manipulator und Laserarbeitskopf	36
3.4. Fernsteuerung / autarkes Arbeiten	37
4. Grundlegende Untersuchungen	38
4.1. Auslegung des Arbeitskopfes	38
4.2. Bau des Arbeitskopfes	42
4.3. Parametervariation	43
4.4. Versuche zum Einfluss von metallischen Objekten an der Oberfläche	50
4.5. Test mit Originalbeton aus dem KKW Würgassen	52
4.6. Temperaturfelder im Beton während der Laserbearbeitung	54

4.6.1.	Wärmeeintrag in die Tiefe der Betonstruktur	54
4.6.2.	Wärmeleitung an der Oberfläche.....	55
4.7.	Abtragsmuster	58
4.8.	Sensorik und Steuerung.....	60
4.8.1.	Aufgaben des Sensorsystems.....	60
4.8.2.	Steuerung des Arbeitskopfes und programmtechnische Umsetzung.....	63
5.	Test unter praxisnahen Bedingungen	67
5.1.	Versuchsaufbau für Demonstrationsversuche	67
5.2.	Durchführung der Demonstrationsversuche	70
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	73
7.	Literaturverzeichnis	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Status stillgelegter Anlagen in Deutschland	22
Tabelle 2: Abschaltzeitraum der deutschen Kernkraftwerke nach dem 13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes.....	22
Tabelle 3: Daten zu konventionellen Dekontaminationsverfahren.....	27
Tabelle 4: mögliche Brennweiten und Strahlformen des 10 kW Diodenlasers	39
Tabelle 5: Parameter der Versuchsreihe 1	44
Tabelle 6: Parameter der Versuchsreihe 2a (Variation der Laserleistung)	45
Tabelle 7: Parameter der Versuchsreihe 2b	46
Tabelle 8: Parameter der Versuchsreihe 3	47
Tabelle 9: Parameter der Versuchsreihe 4	48
Tabelle 10: Parameter zu Versuchen mit Proben aus dem KKW Würgassen	52
Tabelle 11: Parameter für Überkopfversuche	59
Tabelle 12: verwendete Laser-Parameter für den Demonstrationsversuch.....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich des mechanischen Abtrags mit dem Laser-Dekontaminationsverfahren	34
Abbildung 2: Prinzip der Laser-Dekontamination.....	38
Abbildung 3: schematische Darstellung der Grundversion des Laserarbeitskopfes	40
Abbildung 4: Anordnung der Ausblasdüsen und Druckluftstrahl	41
Abbildung 5: perspektivische Darstellung des Arbeitskopfes für die Abtragversuche (Grundversion).....	42
Abbildung 6: Versuchsaufbau für Abtragversuche (Laserarbeitskopf hoch gefahren)	43
Abbildung 7: Spuren der Versuche S01-01 (links) und S01-02 (rechts).....	44
Abbildung 8: Abtragversuche der Versuchsreihe 2.....	45
Abbildung 9: Abtragversuche der Versuchsreihe 3.....	47
Abbildung 10: Spur aus Versuchsreihe S04-03 mit Schmelzeansammlung in der Mitte	49
Abbildung 11: schematische Darstellung der Grundversion des Laserarbeitskopfes	49
Abbildung 12: Laser-Spur unter Verwendung aller drei Vollstrahldüsen und der beiden Flachstrahldüsen	50
Abbildung 13: mit Schrauben und Nägeln präparierter Betonstein.....	51
Abbildung 14: links: Schraube (eingekreist in Abbildung 13) nach 1. Bearbeitungsschritt; rechts: Schraube nach 2. Bearbeitungsschritt.....	51
Abbildung 15: Laser bearbeitete Betonprobe aus dem KKW Würgassen	53
Abbildung 16: Abtragtiefe; links: mit 400 mm/min Vorschub, rechts: mit 200 mm/min Vorschub	53
Abbildung 17: links: präparierter Stein mit Thermoelementen, rechts: Schema Querschnitt	54
Abbildung 18: Temperatureintrag in tiefere Schichten	55
Abbildung 19: links: Versuchsaufbau Temperaturmessung; rechts: Messstellen und Bearbeitungsspuren auf Betonprobe	56
Abbildung 20: Temperaturverlauf im Oberflächenbereich während der Laserbearbeitung	56
Abbildung 21: Temperaturverlauf auf Beton und am Gehäuse	57
Abbildung 22: links: Bewegungsrichtungen an einer Wand; rechts oben: Versuchsaufbau für vertikalen Abtrag; rechts unten: Aufbau für horizontalen Abtrag	58
Abbildung 23: links: Versuchsaufbau „Überkopfarbeiten“; mittig und rechts: bearbeitete Oberflächen.....	59
Abbildung 24: vorangeschaltete Sensorik und Laserarbeitskopf.....	60
Abbildung 25: Messbereich der verwendeten Ultraschallsensoren (Quelle: www.microsonic.de)	61
Abbildung 26: Manipulator angesetzt an Wand, Position der Sensorik und der Subchassis	63

Abbildung 27: Ablaufplan des Programms für den MANOLA Laserdekontaminationsprozess.....	64
Abbildung 28: Programmablauf kapazitiver Sensor	65
Abbildung 29: schematische Darstellung des SubVIs Ultraschallsensor.....	66
Abbildung 30: Schema des SubVIs Metalldetektor	66
Abbildung 31: aufgestellte Versuchswand innerhalb des Sichtschutzes; rechts: Seitenansicht	68
Abbildung 32: Videoaufnahme während der Versuche mit an der Versuchswand angesaugtem Manipulator	69
Abbildung 33: mit Kran gesicherter Manipulator (Blick von oben auf den Manipulator); kleines Bild rechts oben: experimentelle Anordnung in der Versuchshalle	69
Abbildung 34: angesaugter Manipulator mit Medienleitungen.....	70
Abbildung 35: zwei nacheinander bearbeitete Spuren auf der Betonoberfläche	72
Abbildung 36: Blick von oben auf Arbeitskopf in Endposition und die bearbeitete Oberfläche	72
Abbildung 37: Ablaufplan für die Bearbeitung mit dem Manipulator.....	73

1. Einleitung und Zielstellung

Nach dem Seebeben vor der Küste Japans, dem dadurch ausgelösten Tsunami und den daraus folgenden Auswirkungen auf die Kernreaktoren in Fukushima, beschloss die Bundesregierung im März ein Moratorium für die ältesten Kernreaktoren und im Juli 2011 die Verkürzung der Restlaufzeiten aller verbleibenden deutschen Reaktoren. Von den zu diesem Zeitpunkt in Deutschland noch betriebenen 17 Anlagen wurden acht sofort und dauerhaft vom Netz genommen. Die restlichen neun Kraftwerke sollen, nach dem Willen der Regierung, bis zum Jahre 2022 stillgelegt werden. Dadurch konzentriert sich die Gesamtzahl der rückzubauenden Kernkraftwerke auf einen relativ begrenzten Zeitraum.

Neben Stahleinbauten und Rohrleitungen, stellt Beton aus den Gebäuden und Schutzbarrieren der Reaktoren den größten Anteil an rückzubauenden Strukturen dar. Sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gesichtspunkten spielt die Minimierung des radioaktiven Abfalls eine entscheidende Rolle. Der Großteil der bisherigen Rückbauprojekte umfasst kleinere Versuchs- und Forschungsreaktoren. In zunehmendem Maße rücken nun die größeren Leistungsreaktoren in den Fokus. Dieser Rückbau erfordert qualifizierte und hoch effektive Verfahren zur Dekontamination von Betonoberflächen mit anschließender Konditionierung der radioaktiven Abfälle.

Die Projekte LASABA I und LASABA II zeigten die prinzipielle Machbarkeit des Laser-Dekontaminationsverfahrens. Dabei wurde demonstriert, dass ein Großteil der radioaktiven Stoffe in der Schmelze fixiert wird (Abprodukt-Konditionierung). Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser beiden Forschungsprojekte wurde im Rahmen des Projektes MANOLA das Verfahren der Laser-Dekontamination radioaktiv belasteter Betonoberfläche weiterentwickelt.

Das Ziel war die Entwicklung eines universell einsetzbaren Verfahrens zum flexiblen und bedarfsgenauen Einsatz für Dekontaminationsarbeiten in Kernkraftwerksanlagen.

Die Einbeziehung eines neuen leistungsstärkeren Diodenlasers mit 10 kW Strahlleistung ermöglichte die Leistungsfähigkeit und damit die Konkurrenzfähigkeit der Lasertechnologie gegenüber konventionellen Verfahren deutlich zu steigern.

In Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde ein industrienahees Dekontaminationssystem entwickelt. Dabei war das KIT für die Entwicklung des Manipulatorsystems verantwortlich. Die TU Dresden übernahm die Entwicklung der Lasertechnologie.

Für den neu zur Verfügung stehenden 10 kW Diodenlaser war ein, für die hohe Leistung ausgelegter Arbeitskopf zu entwickeln und zu bauen. Der neue Arbeitskopf ermöglicht die

synchrone Ausführung der drei notwendigen Arbeitsschritte für die Laser-Dekontamination: das Aufschmelzen der Betonoberfläche, das Austragen der Schmelze und das anschließende Absaugen der ausgetragenen Schmelzepartikel.

Der Arbeitskopf besitzt darüber hinaus eine speziell an den Manipulatoreinsatz angepasste Sensorik. Diese dient der Sicherung des optimalen Abstandes zwischen Arbeitskopf und zu bearbeitender Oberfläche. Desweiteren werden Störkanten in Bearbeitungsrichtung sowie oberflächennahe metallische Objekte erkannt, die den Abtragprozess negativ beeinflussen könnten. Nach Auslegung und Bau des Arbeitskopfes wurden in Versuchen die optimalen Prozeßparameter ermittelt und der Arbeitskopf in Hinblick auf den späteren Praxiseinsatz optimiert.

Als letzter Schritt wurden, in Kooperation mit dem Partner KIT, der Laserarbeitskopf und der Manipulator als Trägergerät zusammengeführt. Hierfür war die Entwicklung einer umfangreichen Steuerungstechnik mit diversen Schnittstellen notwendig, welche ein autarkes Arbeiten des Manipulators ermöglicht und eine Verringerung der Belastung für das Personal in radioaktiv belasteten Bereichen ermöglicht.

In einem abschließenden Versuch wurde die technische Machbarkeit der manipulatorgesteuerten Laser-Dekontamination demonstriert.

2. Rückbau kerntechnischer Anlagen

Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage stellt ein komplexes, zeit- und kostenintensives Projekt dar. Im Mai 2008 waren in Europa 146 kerntechnische Anlagen in Betrieb. Weiterhin waren 74 Anlagen abgeschaltet, wovon sich 69 im Rückbau befinden. In Deutschland wurden bisher zwei Anlagen komplett zurückgebaut. Diese sind der Heißdampfreaktor in Großwelzheim und das Kernkraftwerk Niederaichbach. Das Ziel des Rückbaus, sofern einzelne Gebäudestrukturen nicht für eine andere Nutzung herangezogen werden, ist die Wiederherstellung der „Grünen Wiese“. Die hierfür existierenden zwei verschiedenen technologischen Strategien werden im Folgenden vorgestellt (Blohm-Hiebe, 2009).

2.1. Varianten des Rückbaus

Für ein Kernkraftwerk sind drei Stadien von Bedeutung: der Bau, der Betrieb und der Rückbau, der nach der Stilllegung der Anlage anschließt. Rückbau bedeutet, dass das KKW in seine Bestandteile zerlegt wird, die je nach Grad der Kontamination oder Aktivierung weiterbehandelt, verpackt und abtransportiert werden oder nach der Strahlenschutzverordnung (StrSchV) § 29 uneingeschränkt freigegeben werden. Ziel dieser Arbeiten ist die spurenlose Beseitigung mit dem Ziel der "Grünen Wiese" (Preussen Elektra AG, 1996). Vor Beginn der Rückbauarbeiten, die eine Anlage unwiderruflich ihrer bisherigen Funktion entheben, muss eine Genehmigung der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde nach ATG § 7 für den Rückbau erteilt werden. Bis dahin bleiben alle sicherheitstechnisch relevanten Systeme des nuklearen Bereichs unangetastet (Anthofer, 2010). Die für den Nach- oder Restbetrieb sicherheitstechnisch relevanten Systeme, wie Löschsysteme, Lüftungssysteme oder Kommunikationssysteme, bleiben weiterhin funktionsfähig. Von den vier Schutzzielen einer kerntechnischen Anlage verbleiben noch die Begrenzung der Strahlenexposition und der Einschluss von Aktivität für den Rückbau. Nach Herstellung der Brennstofffreiheit entfallen die beiden Schutzziele der Kontrolle der Reaktivität und Kühlung der Brennelemente. Die Brennstofffreiheit ist Grundlage der Rückbaugenehmigung (Anthofer, 2010).

Für den Rückbau einer kerntechnischen Anlage existieren zwei grundsätzlich verschiedene Strategien. Dies sind der „direkte Rückbau“ oder auch „unmittelbare Stilllegung“ genannt und der gestaffelte Rückbau mit der Herbeiführung eines „Sicheren Einschlusses“ und einem späteren Rückbau der Anlage.

Bei der Strategie des „direkten Rückbaus“ beginnen unmittelbar nach der Entscheidung zur Abschaltung der Anlage die Vorbereitungen für den Rückbau. Der Vorteil dieser Strategie liegt in der Nutzung der noch vorhandenen Infrastruktur und Ressourcen, speziell auch des Betriebspersonals. So wird einem Teil des Anlagenpersonals eine Weiterbeschäftigung er-

möglich. Ein weiterer Vorteil des direkten Rückbaus ist die gute messtechnische Erfassung von Leitnucliden wie Co-60 und Cs-137. Allerdings ist bei dieser Vorgehensweise mit einer größeren Menge radioaktiven Abfalls und zu dekontaminierenden Flächen zu rechnen.

Laut dem Bericht der EU-Kommission an das Europäische Parlament vom Oktober 2004 haben sich sechs Länder in Europa für die unmittelbare Stilllegung von kerntechnischen Anlagen entschieden. Dazu gehören Deutschland, Finnland, Italien, Litauen, Slowenien und Spanien. Zu beachten ist dabei, „dass mit Beginn der Stilllegung beträchtliche Finanzmittel bereitgestellt werden müssen.“ In dem Bericht der EU-Kommission wird der Finanzbedarf für den Rückbau mit 10-15 % der Kosten für die Errichtung der Anlage veranschlagt. (2)

Die zweite Möglichkeit ist der gestaffelte Rückbau. Nach dem Abschalten der Anlage und der Nachbetriebsphase wird die Anlage in den „Sicheren Einschluss“ überführt. Dabei werden die nicht mehr benötigten Nebenanlagen und angrenzende Gebäude abgebaut. Im Vordergrund steht der Erhalt der Anlage und der Gebäudestruktur. In Europa haben sich die Niederlande, die Slowakische Republik, die Tschechische Republik und Ungarn für eine gestaffelte Stilllegung entschieden. Während dieses sogenannten „Konservierungsbetriebes“ klingt die radioaktive Belastung im Inneren der Anlage weiter ab. Auf diese Weise lassen sich die Mengen an radioaktiven Abfällen senken. Auch der Aufwand für Dekontaminationsarbeiten nimmt ab. Dadurch lassen sich die Kosten für den späteren Rückbau senken. Andererseits fallen auch für die Dauer des Konservierungsbetriebes und die Aufrechterhaltung und Wartung relevanter Systeme zusätzliche Kosten an. Ein Nachteil des gestaffelten Rückbaus liegt in der komplizierten Messtechnik begründet. Das Strahleninventar ist gegenüber dem direkten Rückbau geringer, dafür aber schwieriger nachweisbar.

Innerhalb eines dreißigjährigen Moratoriums der Anlage im sicheren Einschluss würden die Kollektivdosis und das Aktivitätsinventar insbesondere durch den Zerfall des Co-60 absinken. Die Halbwertszeit von Co-60 beträgt $T_{1/2}(\text{Co-60}) = 5,27 \text{ a}$ und von Cs-137 $T_{1/2}(\text{Cs-137}) = 30,17 \text{ a}$. Radiologisch ergibt dies einerseits einen Vorteil aus Sicht des Strahlenschutzes, da das Rückbaupersonal weniger belastet wird. Andererseits existiert gegenüber dem direkten Rückbau hinsichtlich der Messtechnik der Nachteil, dass messbare Leitnuclide zerfallen und stattdessen langlebige Alphastrahler vorhanden sind und dadurch der Messaufbau verkompliziert wird. (Anthofer, 2010)

Die Dauer des Sicheren Einschlusses hängt von verschiedenen Faktoren ab und wird in den verschiedenen EU-Staaten unterschiedlich gehandhabt. In Frankreich waren ursprünglich 50 Jahre für den sicheren Einschluss geplant, in Großbritannien 135 Jahre, während die Niederlande für Dodewaard lediglich 40 Jahre vorgesehen haben. (Thierfeldt, et al., 2009)

Belgien, Frankreich, Schweden und Großbritannien haben sich noch nicht endgültig auf eine Strategie festgelegt. Aufgrund von Akzeptanzproblemen in Teilen der Bevölkerung ist aber auch in diesen Ländern vermehrt mit einem direkten Rückbau der meisten Reaktoren zu rechnen. Die EU Kommission geht in ihrem ersten Statusbericht aus dem Jahre 2004 davon aus, „dass bis 2025 von den zurzeit in der Europäischen Union betriebenen 150 Reaktoren 50 bis 60 stillgelegt sind.“ Es ist davon auszugehen, dass der Rückbau in ganz Europa an Bedeutung gewinnen wird. (EU-Kommission, 2004)

Unabhängig von der gewählten Variante müssen die Großkomponenten letztendlich zerlegt und entsorgt, umfangreiche Dekontaminationsarbeiten durchgeführt und im Anschluss nicht weiter nutzbare Gebäudestrukturen abgerissen werden. Die Vorgehensweise beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage wird im folgenden Kapitel 2.2 beschrieben.

2.2. Rückbau in Deutschland

Der Status der bereits vor den Ereignissen in Fukushima abgeschalteten kerntechnischen Anlagen ist in Tabelle 1 dargestellt. In Deutschland wird bisher die Strategie des unmittelbaren Rückbaus verfolgt. Lediglich das KKW Lingen befindet sich derzeit im „Sicheren Einschluss“. Dieser wurde am 30.03.1988 herbeigeführt und in der Genehmigung auf 25 Jahre festgelegt. Im Jahr 2013 beginnt der Rückbau der Anlage. Alle anderen Anlagen in Deutschland befinden sich entweder schon in der Phase des Rückbaus oder in der Genehmigungsphase für den Rückbau.

Durch das neue Energiekonzept der Bundesregierung wurden acht weitere Reaktoren dauerhaft abgeschaltet. Für die restlichen neun Reaktoren wurde eine Betriebsdauer von 32 Jahren angesetzt. Somit ergeben sich für diese Kraftwerke die in der Tabelle 2 zusammengefassten Jahre bis zur voraussichtlichen Stilllegung. Aus den Erfahrungen zum Rückbau bisheriger kerntechnischer Anlagen (z.B. KKW Würgassen, Stilllegung 1994, Rückbau geplant 2013; KKW Stade, Stilllegung 2003, Rückbau geplant bis 2016) ist mit einem Zeitraum von mindestens zehn bis fünfzehn Jahren zu rechnen. Aufgrund der Vielzahl der Anlagen, die in diesem Jahr abgeschaltet werden und der Abschaltung von neun Kernkraftwerken in den nächsten elf Jahren, wird sich der Aufwand für den Rückbau in Deutschland in Zukunft deutlich erhöhen. Allein diese Fakten lassen einen erhöhten Bedarf an neuen Technologien und Optimierungen für den gesamten Rückbauprozess erkennen.

Tabelle 1: Status stillgelegter Anlagen in Deutschland

Name	Jahr der Stilllegung	Betreiber	Status	Rückbau
Greifswald	1990	Energiewerke Nord	Rückbau	vorwiegend eigenes Personal - EWN
Großwelzheim	1971	Heißdampfreaktor- Betriebsgesellschaft mbH	Grüne Wiese	abgeschlossen
Gundremmingen	1977	E.ON (25%) RWE (75%)	Rückbau	
Hamm-Uentrop	1988	HKG (Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH)	Sicherer Einschluss	
Jülich	1988	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor GmbH	Rückbau	EWN
Kahl	1985	VAK Kahl	Grüne Wiese	
Karlsruhe	1984	Kernkraftwerk-Betriebsgesellschaft mbH	Rückbau	EWN
Lingen	1977	RWE	Sicherer Einschluss	
Mühlheim-Kärlich	1988	RWE	Rückbau	Org+Planung: RWE Power AG Ausführung ca. 200 Personen (Fremdfirmen)
Niederaichbach	1974	Bayernwerk AG	Grüne Wiese	abgeschlossen
Obrigheim	2005	EnBW	Stillgelegt	Org+Planung: EnBW
Rheinsberg	1990	Energiewerke Nord	Rückbau	vorwiegend durch eigenes Personal - EWN
Stade	2003	E.ON (66,7 %) Vattenfall (33,3 %)	Rückbau	vorwiegend durch eigenes Personal
Würgassen	1994	E.ON Kernkraft	Rückbau	vorwiegend durch eigenes Personal

Tabelle 2: Abschaltzeitraum der deutschen Kernkraftwerke nach dem 13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes

(voraussichtliche) Stilllegung	Kernkraftwerke
2011	Biblis A, Biblis B, Brunsbüttel, Isar 1, Krümmel, Neckarwestheim 1, Philippsburg 1, Unterweser
2015	Grafenrheinfeld
2017	Gundremmingen B
2019	Philippsburg 2
2021	Brokdorf, Grohnde, Gundremmingen C,
2022	Emsland, Isar 2, Neckarwestheim 2

Der Rückbau einer kerntechnischen Anlage lässt sich in verschiedene Abschnitte einteilen. Nach dem offiziellen Ende des Leistungsbetriebs der Anlage zur Stromerzeugung und der Erteilung der einzelnen Genehmigungen durch die zuständigen Behörden wird mit dem Abbau von nicht mehr benötigten Anlagenteilen im konventionellen Abschnitt begonnen. Parallel dazu läuft der Restbetrieb einiger für den Rückbau benötigter Systeme wie Lüftungsanlagen oder Wasseraufbereitung. Im Anschluss werden in Phase II weitere Komponenten, insbesondere Rohrleitungen demontiert, so zum Beispiel die Frischdampfleitungen und Leitungen der für den Leistungsbetrieb notwendigen Notkühlsysteme.

In der dritten Phase erfolgt der Rückbau von Systemen um den Reaktordruckbehälter (RDB). Der RDB selbst wird in der vierten Phase zerlegt. Zuvor müssen alle Einbauten demontiert werden. Im Anschluss wird der nukleare Teil des Kernkraftwerks rückgebaut. Neben dem RDB steht hier der biologische Schild im Fokus.

Das Ziel der abschließenden Phase V ist es, alle Gebäude aus dem Kontrollbereich zu entlassen. Dies umfasst insbesondere die vollständige Dekontamination und die anschließende Freimessung. Nach einer erfolgreichen Freimessung können die Gebäude für andere Zwecke genutzt oder vollständig abgerissen werden. Im folgenden Abschnitt sollen die möglichen Verfahren zum Zerlegen und Dekontaminieren von Betonstrukturen betrachtet werden, welche insbesondere in den letzten beiden Phasen des Rückbaus zur Anwendung kommen. (Thierfeldt, et al., 2009)

Der Betreiber des Kernkraftwerks Obrigheim nahm dieses 2005 vom Netz und legte es still. Im Herbst 2008 begann, nach erfolgter Genehmigung, die erste Rückbauphase. Der ehemalige Betreiber EnBW rechnet mit einer Dauer des Rückbaus von 10 - 15 Jahren (EnBW). Das KKW Stade wurde aus wirtschaftlichen Gründen im Jahre 2003 stillgelegt. Am Ende des Jahres 2010 wurde der RDB durch ein Konsortium aus NIS und EAS erfolgreich demontiert und zerlegt (Loeb, 2011).

Der Rückbau der Blöcke des KKW Greifswald durch die EWN GmbH ist deutlich weiter voran geschritten. Alle Großkomponenten wurden entfernt. Im Jahr 2012 soll der Rückbau des KKW beendet sein. Nach der Übernahme der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor in Jülich (AVR) und der Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe (WAK) in den Jahren 2003 und 2006, führt die EWN-Gruppe die Rückbaumaßnahmen an den jeweiligen Standorten durch. Das erworbene Know-How durch den Rückbau an den beiden Standorten Greifswald und Rheinsberg spielte hierbei eine entscheidende Rolle. Mittlerweile ist die EWN auch international auf dem Sektor Rückbau und Entsorgung tätig, so zum Beispiel seit 2003 bei der Entsorgung von Atom-U-Booten in Russland. (EWN)

Der älteste Leistungs-Siedewasserreaktor Deutschlands, das Kernkraftwerk Würgassen (KWW), befindet sich ebenfalls im Rückbau. Am Beispiel dieses Kraftwerks sollen die wesentlichen Schritte eines direkten Rückbaus kurz aufgezeigt werden. Das KWW war der erste kommerziell genutzte Siedewasserreaktor Deutschlands. Der Leistungsbetrieb wurde 1994 aus wirtschaftlichen Gründen beendet, nachdem bei einer Prüfung Rissanzeichen an Kerneinbauten des Reaktordruckgefäßes festgestellt wurden. Während der Laufzeit wurden 72922 GWh erzeugt. Das KWW besaß eine Leistung von 640 MWel. Es folgte der Stillstandsbetrieb. Parallel dazu wurden die Genehmigungen für die Rückbauphasen I und II vorbereitet und eingereicht sowie das Zwischenlager für radioaktive Abfälle im Unabhängigen Nachkühlungs-Gebäude (UNS) eingerichtet. Dort werden Stoffe der übrigen Rückbauphasen zwischengelagert. 1996 wurden die letzten Brennelemente aus dem KKW abtransportiert. Im Jahr 1997 begann der Rückbau der Anlage. Nach der Demontage einiger peripherer Systeme, sowie der Frischdampfleitungen und Notkühlungsanlagen begann 1999 Phase III des Rückbaus. Diese beinhaltet unter anderem das Zerlegen der Kerneinbauten, die Demontage von Systemen des Sicherheitsbehälters (SHB) und die Entsorgung des RDB-Deckels. Die Phasen IV und V haben das Restfreiräumen, die Freigabe der Gebäudestrukturen und schließlich den konventionellen Abriss der Gebäude zum Ziel. Im Jahr 2008 waren sämtliche RDB-Einbauten vollständig demontiert und zerlegt. Parallel dazu wurden ab 2008 die ersten „Musterräume“ dekontaminiert, um Verfahrensprozesse zu erproben, zu optimieren und diese nach anschließender Freimessung aus den Kontrollbereichsbedingungen zu entlassen. Hierfür wurden im Reaktorgebäude 700 m² und im Maschinenhaus 3000 m² dekontaminiert. 2009 wurden der RDB mit Bandsägen und Wasser-Abrasive-Suspensions-Schneidtechnik in 250 Einzelteile zerlegt. Bis 2014 soll der Rückbau komplett abgeschlossen sein. Die gesamte Rückbaumasse des KWW beläuft sich auf 255000 Mg, wovon rund 97 % nach StrlSchV § 29 freigegeben werden, 1 % wird recycelt und rund 2 % werden als radioaktiver Müll zuerst in das UNS-Gebäude zwischen- und später in einem Endlager endgelagert. (EKK)

Ein Beispiel für einen Druckwasserreaktor im Rückbau ist das KKW Stade (KKS). Der seit 1972 im Leistungsbetrieb befindliche Reaktor besaß 630 MWel und wurde 1995 aus wirtschaftlichen Gründen stillgelegt. Zu diesem Zeitpunkt existierten bereits Planungen zu Strategien des Rückbaus. So wurde das Lager für radioaktive Abfälle (LaRa) in einem separaten Kontrollbereich außerhalb des Kraftwerkgebäudes gebaut, sodass die Gebäudestrukturen bis 2014 aus der Obhut der atomrechtlichen Überwachung entlassen werden können. Im Gegensatz zum KWW unterliegt beim KKS das Maschinenhaus nicht der atomrechtlichen Aufsicht, sodass dieses konventionell und schon vor Erteilung der Rückbaugenehmigung abgebaut werden kann. 132000 Mg werden nach Schätzung aus dem nuklearen Bereich abgebaut, wovon 97,3 % dem Entsorgungsziel einer uneingeschränkten

Freigabe zugeführt werden sollen. Die verbleibenden ca. 2,3 % radioaktiven Abfälle entsprechen einem Nenngewicht von 3.036 Mg. (EON)

2.3. Verfahren zum Rückbau kerntechnischer Anlagen

Alle aus dem Kontrollbereich eines KWW zu entsorgenden Stoffe aus Betrieb und Rückbau werden als radioaktiver Reststoff bezeichnet. Der größte Teil der radioaktiven Reststoffe wird durch geeignete Dekontaminationsmaßnahmen der uneingeschränkten Freigabe zugeführt. Für Stoffe, welche nicht uneingeschränkt freigegeben werden, stehen nach § 29 StrSchV die Entsorgungsziele Deponierung und Rezyklierung zur Verfügung. Die Wiederverwendung von Bauteilen innerhalb des Kontrollbereichs in einem anderen KKW ist ebenfalls gebräuchliche Praxis. Der verbleibende Teil, sowie der bei der Anwendung von Dekontaminationsmaßnahmen anfallende radioaktive Sekundärmüll, werden als radioaktiver Abfall bezeichnet. Zur Reststoffbehandlung zählen Nachzerlegung, Dekontaminationsmaßnahmen und Konditionierung.

Im Folgenden werden die beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zum Einsatz kommenden Verfahren kurz vorgestellt. Dabei wird zwischen Zerlege- und Dekontaminationsverfahren unterschieden. Die Dekontaminationsverfahren werden nach den zugrundeliegenden physikalischen Prozessen noch einmal in mechanisch/hydraulische, thermische und chemischen Verfahren unterteilt. Das Laser-Dekontaminationsverfahren wird in die Gruppe der thermischen Verfahren eingeordnet. Im Anschluss an die Dekontaminationsverfahren werden die Zerlegetechniken kurz vorgestellt. Diese basieren entweder auf dem Austrag von Material durch mechanische Kräfte oder durch Aufschmelzen des Materials und anschließendem Austrag aus der Trennfuge.

2.3.1. Mechanische und hydraulische Dekontaminationsverfahren

Alle mechanischen und hydraulischen Verfahren beruhen auf dem Eintrag von mechanischen Kräften in das Bauteil, welche die Zerstörung der Struktur zur Folge haben. Je nach Art des Eintrages und der Geometrie des Werkzeugs, lassen sich verschiedene Verfahren unterscheiden. Zu diesen gehören Wasserstrahlverfahren, Schleifen, Fräsen, Bohren, Nadler und Hammerwerke sowie Abrasivstrahlverfahren (Sandstrahlen, Kugelstrahlen).

Wasserstrahlverfahren lassen sich in Wasserstrahlverfahren ohne Zusatzmittel und mit Zusatzmittel unterteilen. Verfahren, welche zusätzlich Stoffe im Wasser enthalten, werden als Wasserabrasivstrahlen bezeichnet.

Verfahren ohne Zusatzstoffe finden hauptsächlich in der Reinigung von Oberflächen Anwendung. Für das Zerlegen von Bauteilen (z.B. Kerneinbauten) eignen sich besonders

Wasserabrasivstrahlverfahren. Alle drei Verfahren setzen die Anwendung von Wasser voraus. Gerade in kontaminierten Bereichen ist dies schwierig, da kontaminiertes Wasser Sekundärabfall ist und einen sorgfältigen Umgang erfordert. Bei Wasserabrasivstrahlverfahren entsteht zusätzlich Sekundärabfall in Form von verbrauchten Abrasivmitteln hinzu. (Witthenauer, 2005)

Statt mit Wasser können Abrasivstrahlverfahren auch trocken betrieben werden. Angewendet werden das Sand- oder das Kugelstrahlverfahren. Durch die Einwirkung der Abrasivmittel auf die Oberfläche und den Übertrag von mechanischen Kräften auf das Bauteil werden Spannungen eingebracht, die letztendlich zum Ablösen von Teilen der Oberfläche führen. Wie bei Wasserstrahlverfahren entstehen bei diesen Verfahren Sekundärabfälle. Die meisten Geräte enthalten Trennvorrichtungen, um das Abrasivmittel wieder aufzubereiten und teilweise wieder zu verwenden und die Abfallmengen somit zu minimieren.

Mit dem Sandstrahlverfahren lassen sich bei normalem Beton Abtragtiefen von einem bis drei Millimeter realisieren. Als Strahlgut eignen sich verschiedene Mineralien; dabei beeinflussen die Eigenschaften des Strahlguts die Abtragfläche pro Zeiteinheit und Qualität des Abtrags wesentlich.

Kugelstrahlverfahren werden aufgrund der großen und schweren Trägergeräte lediglich für Böden oder gering geneigte Räume eingesetzt. Es sind aber auch Handgeräte verfügbar, welche den Einsatz an vertikalen Oberflächen erlauben. (Müller, et al., 2009)

Fräs- und Schleifverfahren eignen sich ebenso für den Abtrag von Betonoberflächen. Beim Fräsen rotiert das zylindrische Werkzeug über der zu bearbeitenden Oberfläche. Die Rotationsachse ist dabei parallel zur Oberfläche. Durch Schläge der Frässscheiben gegen die Oberfläche werden Betonstücke und Staub abgelöst und können im Anschluss abgesaugt werden.

Fräsmaschinen für den Einsatz beim Rückbau kerntechnische Anlagen sind in allen Größen von handgeführten Geräten bis zum Anbaugerät an Gabelstapler verfügbar. Wie bei allen mechanischen Verfahren besteht das Werkzeug aus diamantbestücktem Hartmetall, um den Verschleiß zu minimieren. Die Abtragsrate variiert stark je nach Art des eingesetzten Fräsystems (siehe auch

Tabelle 3). Für alle Frässysteme ist eine effiziente Absaugung notwendig, um Querkontamination durch die hohe Staubproduktion zu vermeiden.

Tabelle 3: Daten zu konventionellen Dekontaminationsverfahren

	Hämmern			Nadeln		Schleifen	
	Handgerät	Floor Scabbler (7 köpfig)	Wall Scabbler (7 köpfig)	handgeführter Nadler	Needle Gun	Handschleifgerät	
Abtragstiefe [mm]	2	3	4	2	5	Oberfläche	
Abtragsrate [m ² /h]	0,6	4,6	8,4	0,8	0,9	2 - 4	
Aufbauzeit [min]	---	120	120				
Pausenzeit	notwendig	---	---	notwendig	---		
Lautstärke [dB]	80 - 100			110	110		
Investkosten (komplett inkl. Absaugung) [€]	2.500 - 4.000			2.300 - 3.600		600 - 3.000 (ohne Zubehör)	
	Fräsen				Abrasivestrahlen		
	Floor-shaver	Wall-shaver	DECON 300	Bolero (Studsvik)	Sandstrahlen	Sandstrahlen	Kugelstrahlen
Abtragstiefe [mm]	1,5	1,5	5	3	Oberfläche	1 - 2	1 - 3
Abtragsrate [m ² /h]	13,6	21	6 - 10	15	20 (45)	0,2 - 0,5	10 - 600*
Aufbauzeit [min]				180 - 360			
Pausenzeit	---	---	---	---			
Lautstärke [dB]	ca. 80	ca. 80	ca. 80	ca. 80			
Investkosten (komplett inkl. Absaugung) [€]	2.000 - 15.000			50.000			

Schleifverfahren besitzen ähnliche Eigenschaften wie Fräsen. Hierbei rotiert die Schleifscheibe über der Oberfläche. Die Rotationsachse steht senkrecht auf der zu bearbeitenden Fläche. Die abgetragenen Partikel sind sehr klein und es wird sehr viel Staub freigesetzt, deshalb ist bei diesem Verfahren eine Absaugung zwingend erforderlich. Bedingt durch das rotierende Werkzeug sind Ecken und Kanten nur schwer und nicht komplett mit Schleifgeräten zu bearbeiten. Die Abtragtiefe ist relativ gering, aus diesem Grund werden Schleifverfahren hauptsächlich zum Abtragen von Lacken oder Anstrichen verwendet.

Sowohl beim Schleifen als auch beim Fräsen fällt kein bzw. kaum Sekundärabfall an. Je nach Ausgestaltung des Verfahrens kann aber eine Kühlung des Werkzeugs (auch mit Wasser) notwendig sein. (Witthenauer, 2005)

Neben den beiden beschriebenen mechanischen Verfahren mit rotierenden Werkzeugen gibt es Nadler und Hammerwerke. Bei diesen wirken die Kräfte senkrecht auf die zu bearbeitende Oberfläche.

Hammerwerke bestehen aus mehreren stumpfen zylinderförmigen Werkzeugen, welche mit hoher Frequenz auf die Oberfläche schlagen. Die Oberfläche platzt dabei ab und die Reststoffe müssen abgesaugt werden. Manuelle Hämmer besitzen eine relativ niedrige Abtragsrate. Mit größeren Geräten sind auch höhere Leistungen erreichbar. Hierbei müssen dann die Zeiten für den Auf- und Abbau sowie evtl. notwendige Umsetzzeiten beachtet werden. Eingesetzt werden Hammerwerke vorwiegend zum Abtrag von Anstrichen und der darunterliegenden Zementsteinhaut. (Witthenauer, 2005)

Im Gegensatz zu Hammerwerken besitzen Nadler dünne Werkzeuge, welche mit hoher Frequenz auf die Oberfläche treffen und Teile davon infolge des Energieeintrags abplatzen. Da die Nadeln unabhängig voneinander mittels Druckluft bewegt werden, ist auch das Bearbeiten von unebenen Oberflächen möglich. Im Vergleich zu Hammerwerken ist die Staubproduktion bei Nadlern deutlich geringer. (Müller, et al., 2009)

2.3.2. Thermische Dekontaminationsverfahren

Für thermische Verfahren gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten des Abtrags:

- 1) Induzieren von Thermospannungen, die zum Abplatzen von Oberflächenteilen führen.
- 2) Aufschmelzen des Materials mit anschließendem Abtrennen bzw. Abheben der Schmelze.

Ein Beispielfahrer für die erste Gruppe ist das Trockeneisstrahlen. Dieses Verfahren hat sowohl eine thermische als auch eine mechanische Komponente. Mit Hilfe von Druckluft werden Pellets aus festem Kohlenstoffdioxid beschleunigt und auf die Oberfläche gestrahlt. Durch das kalte Strahlmittel, die Schmelztemperatur von CO₂ liegt bei ca. -79 °C, werden Thermospannungen in die Oberfläche eingebracht. Gleichzeitig wirken die Pellets abrasiv ähnlich wie Sand- und Kugelstrahlen. Durch diese beiden Effekte werden Teile der Oberfläche abgelöst. Da das Kohlenstoffdioxid im Anschluss an den Prozess verdampft, entsteht bei diesem Verfahren kein zusätzlicher Sekundärabfall. Neben der Technik für das Verfahren ist die Bereitstellung des Trockeneises notwendig. (Schönit, 2005)

Ein zweites thermisches Verfahren ist die Laser-Ablation. Im Gegensatz zum Laser-Dekontaminationsverfahren wird hierbei ein Laser mit gepulstem Strahl eingesetzt. Durch die hohe Pulsfrequenz und die hohen Leistungsspitzen werden infolge der Absorption der La-

serstrahlung große Thermospannungen in die Oberfläche eingebracht, die zu einem Abplatzen der oberen Schichten führen.

Eine weitere Möglichkeit für das Abtragen von Oberflächenschichten ist die Verwendung von flüssigem Stickstoff. Das Werkstück wird in das Fluid getaucht ($T < -196\text{ °C}$); durch die starke Abkühlung kommt es zu Thermospannungen an der Oberfläche, welche ein Abplatzen der oberen Schicht bewirken.

2.3.3. Chemische Dekontaminationsverfahren

Für chemische Verfahren gibt es zwei prinzipielle Unterscheidungen je nach Art der Anwendung der Chemikalien. Beim ersten Verfahren wird die Chemikalie auf das Bauteil aufgetragen. Die radioaktiven Stoffe werden gelöst und beim anschließenden Abspülen der Oberfläche zusammen mit der Chemikalie wieder entfernt. Dieses Verfahren wird beispielsweise für die Reinigung von Rohrleitungen verwendet. Die zweite Verfahrensvariante ist das Eintauchen eines Bauteils in eine chemische Lösung. In dem Bad werden die radioaktiven Stoffe gelöst. Hierfür können aufwendige Schritte zur Vorbereitung notwendig sein.

Beide Verfahren haben gemeinsam, dass neben dem radioaktiven Material noch Chemikalien und kontaminiertes Wasser als Sekundärabfälle anfallen. Desweiteren können Dämpfe austreten, dafür ist die Produktion von Staub relativ gering.

2.3.4. Thermische Zerlegeverfahren

Thermische Zerlegetechniken werden zum Großteil für das Trennen metallischer Großkomponenten verwendet. Weisen diese eine hohe Aktivität auf, ist ein Trennen unter Wasser aus radiologischer Sicht zwingend notwendig. Daraus folgt, dass viele der konventionellen Technologien, die sonst an Luft Anwendung finden, für den Einsatz unter Wasser ausgelegt werden müssen. Die gängigsten thermischen Zerlegeverfahren werden im Folgenden aufgeführt und kurz erläutert. Für die Beschreibung der einzelnen Verfahren wurde zum Großteil auf die Quellen (Schönit, 2005) und (Müller, et al., 2009) zurückgegriffen.

Autogenes Brennschneiden

Das autogene Brennschneiden basiert auf der Oxidation des Materials. Eine Flamme aus Sauerstoff und Brenngas (z.B. Methan oder Acetylen) wird auf das zu zerlegende Werkstück gerichtet. Nach Erreichen der Zündtemperatur oxidiert das Material unter der Flamme. Die Reststoffe werden ausgetragen. Mit diesem Verfahren lassen sich auch sehr dickwandige Bauteile zerlegen, weswegen es in vielen Bereichen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

Anwendung findet. Der Einsatz ist auch unter Wasser möglich, das oxidierte Material muss dabei abgesaugt werden.

Laserschneiden

Das Trennen des Materials erfolgt mit Hilfe eines Leistungslasers. Dabei sind drei verschiedene Verfahren möglich. So kann das Material ähnlich dem autogenen Brennschneiden oxidiert werden. Hierfür ist ein Sauerstoffstrahl notwendig, welcher das erhitzte Material verbrennt. Wird statt des Sauerstoffs ein Inertgas verwendet, schmilzt das Material lediglich auf und wird anschließend durch den Luftstrahl ausgetragen. Die dritte Möglichkeit ist das Verdampfen des Materials durch den energiereichen Laserstrahl. Diese Verfahrensvariante wird auch als Laserstrahl-Sublimierschneiden bezeichnet.

Plasmaschneiden

Bei diesem Verfahren fungiert der Brenner als Kathode und das Werkstück als Anode. Aus dem Brenner wird ein Plasmagas (z.B. Argon, Sauerstoff, Stickstoff) auf das Werkstück geleitet. Durch das Anlegen einer Spannung an Werkstück und Brenner wird das Inertgas ionisiert und der Stromkreis geschlossen. Durch die hohe Energie des Plasmagases wird das Material aufgeschmolzen und mit dem aus der Schnittfuge strömenden Plasmagas ausgetragen. Das Plasmaschneiden ist eines der gängigsten Verfahren beim Trennen von elektrisch leitenden Werkstoffen.

Brennbohren mit Sauerstoffkernlanzen

Bei diesem Verfahren befinden sich in einem Mantelrohr aus Stahl mehrere Drähte aus Aluminium oder Stahl. Mit einem Brenner wird die Spitze erhitzt und im Anschluss elektrisch gezündet. Durch die Zugabe von Sauerstoff wird der Oxidationsprozess aufrecht erhalten. In diesem Bereich herrschen Temperaturen bis zu 2700 °C. Mit diesem Werkzeug ist es möglich, durch Schmelzprozesse Stahl und Beton zu trennen oder Löcher in diesen einzubringen. Das aufgeschmolzene Material wird mit dem Gasstrom ausgetragen.

Schmelzschnitten mit Pulverschneidbrennern

Bei diesem Verfahren handelt sich um eine Weiterentwicklung des autogenen Brennschneidens. Ein metallisches Pulvergemisch wird in einer Sauerstoff-Brenngasflamme erhitzt und unter Zuhilfenahme von Schneidsauerstoff entzündet. Die erreichbaren Temperaturen liegen deutlich über denen des autogenen Brennschneidens. Das zu trennende Werkstück wird aufgeschmolzen und das Material durch den Gasstrom aus der Fuge ausgetragen. Der Einsatz dieses Verfahrens unter Wasser ist nicht möglich.

Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden

Dieses Verfahren basiert auf einem Lichtbogen, der zwischen einem Endlosdraht und dem Werkstück gezündet wird. Das Material und die Spitze des Drahtes schmelzen dabei ab, so dass der Draht kontinuierlich nachgeführt werden muss. Für dieses Verfahren sind sehr hohe Stromstärken notwendig, um den Lichtbogen aufrecht zu erhalten. Der Austrag der Schmelze erfolgt durch einen zielgerichteten Wasserstrahl.

Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden

Ein dem Lichtbogen-Wasserstrahl-Draht-Schneiden ähnliches Verfahren ist das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden. Bei diesem wird die Elektrode nicht verbraucht. Sie besteht aus Graphit und wird nach dem Anlegen der Spannung näher an das Bauteil gefahren bis es zum Kontakt kommt. Durch den nun fließenden hohen Strom wird das Werkstück aufgeschmolzen und das Material mit einem Wasserstrahl ausgetragen. Dabei wird der direkte Stromfluss unterbrochen und es bildet sich ein Lichtbogen. Dieser lässt den Prozess fortfahren. Wird durch den zunehmenden Materialaustrag der Abstand zwischen Elektrode und Werkstück zu groß, bricht der Lichtbogen ab und erst durch den Vorschub der Elektrode und den anschließenden Kontakt mit dem Werkstück beginnt der Prozess von vorn. Durch die hohen Belastungen kommt es zum Verschleiß der Elektrode. Beide Lichtbogenverfahren sind unter Wasser auch in größeren Tiefen einsetzbar. (Schönit, 2005)

2.3.5. Mechanische Zerlegeverfahren

Wie bei mechanischen Dekontaminationsverfahren erfolgt bei mechanischen Zerlegeverfahren ein Abtrag von Material durch den Übertrag von mechanischen Kräften. Diese gehen meist mit großen Rückstellkräften und teilweise Schwingungen einher, welche eine Aufnahme durch das Gesamtsystem erfordern. Die einzelnen Verfahrensmöglichkeiten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Fräsen und Wasserstrahlen (in diesem Fall dann als Wasserstrahlschneiden bezeichnet) sind neben der Dekontamination auch als Trennverfahren geeignet. Bis auf kleine Modifikationen handelt es sich dabei um die gleichen Verfahren wie sie im Kapitel 2.3.1 beschrieben sind. Die häufigsten mechanischen Trennverfahren sind verschiedene Varianten des Sägens.

Sägen

Sägen sind Werkzeuge mit Zähnen, welche über das Werkstück bewegt werden. Unterstützt durch den Vorschub wird dabei Material von der Oberfläche abgelöst und es bildet sich eine Schnittfuge. Sägewerkzeuge gibt es in sehr vielen verschiedenen Ausführungen (Stichsägen, Bandsägen, Kreissägen). Gemeinsam ist allen Verfahren, dass sie einen relativ hohen Platzbedarf besitzen und vom Werkzeug sehr hohe Rückstellkräfte aufgenommen werden müssen. Trotz allem sind Sägeverfahren sehr weit verbreitet und kommen bei nahezu allen Rückbauprojekten zum Zerlegen von Komponenten zum Einsatz. (Witthenauer, 2005)

Seilsägen

Eine besondere Form des Sägens ist das Seilsägen. Mit diesem Verfahren lassen sich verschiedenste Geometrien bearbeiten. Auch hinsichtlich der zu bearbeitenden Werkstoffe gibt es keine nennenswerten Einschränkungen im kerntechnischen Bereich. Bei diesem Verfahren wird ein Stahlseil, bestückt mit rollenförmigen Bornitridsegmenten um oder durch das zu bearbeitende Bauteil gezogen. Die in den Schneidsegmenten enthaltenen Industriediamanten brechen kleinste Teile aus dem Werkstück heraus. Dabei bildet sich eine relativ breite Schnittfuge aus und es wird, im Vergleich zu anderen Verfahren, relativ viel Material ausgefragt. Auch dieses Verfahren findet eine sehr häufige Verbreitung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. (Witthenauer, 2005)

Trennschneiden

Trennschneiden wird für das Zerteilen von kleineren Bauteilen verwendet. Dabei sind Schnitttiefen bis 30 mm mit Hilfe einer schnell rotierenden Trennscheibe möglich. Das Verfahren kann sowohl an Luft als auch unter Wasser durchgeführt werden. Durch den sehr feinkörnigen Materialabtrag entsteht bei diesem Verfahren eine hohe Menge an Staub und Aerosolen, so dass spezielle Filtersysteme notwendig sind. Ebenso müssen bei diesem Verfahren hohe Rückstellkräfte aufgenommen werden. (Witthenauer, 2005), (Müller, et al., 2009)

Scherverfahren

Scherverfahren basieren auf der Einwirkung von hohen Scherkräften, welche durch zwei Schneiden auf das Werkstück übertragen werden. Durch die sehr hohen Kräfte wird das Bauteil durchtrennt. Das Verfahren kann sowohl an Luft als auch unter Wasser eingesetzt werden. Anwendung findet das Scheren meist beim Trennen von Rohren oder den Einbauten des RDB. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass dabei neben den getrennten Bauteilen keine Abfälle entstehen. (Witthenauer, 2005), (Müller, et al., 2009)

Sprengen

Im kerntechnischen Bereich werden drei verschiedene Formen des Sprengens angewendet. Dies sind Sprengen mit vorgeformten Ladungen, Sprengen mit Ladungen in vorgebohrten Löchern sowie die Verwendung von Detonationsschnüren. Mit vorgeformten Ladungen werden bevorzugt Stahlstrukturen getrennt. Die Explosion wird so ausgeführt, dass sie sich nur in eine Richtung ausbreitet und das Bauteil zerlegt. Detonationsschnüre werden außen auf die Bauteile, zum Beispiel Rohre, aufgebracht. Das Rohr wird dann durch viele kleine, aufeinanderfolgende Zündungen getrennt. Das Sprengen mit Bohrungen wird hauptsächlich zum Zerlegen von Betonstrukturen verwendet. Das Anbringen und Anwenden der Sprengladungen erfordert nur einen geringen Zeitaufwand, allerdings sind in der Vorbereitung zum Teil umfangreiche Schutzmaßnahmen notwendig, um Anlagenteile und Personen vor den Druckwellen zu schützen. Sprengverfahren werden deshalb nur begrenzt beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt. (Witthenauer, 2005)

Kernlochbohren

Ein weiteres mechanisches Verfahren ist das Kernlochbohren. Dieses Verfahren, welches nicht direkt dem Rückbau dient, wird als Hilfsmittel für andere Verfahren, z.B. Seilsägen, eingesetzt. Damit werden Durchbrüche für das Durchführen der Diamantseile hergestellt. Weiterhin können damit Proben aus der Wand genommen werden. Kernbohrungen sind praktisch in nahezu allen Größen bis 1 m Durchmesser und bis zu einer Tiefe von 6 m möglich. (Witthenauer, 2005)

2.4. Vergleich zwischen konventionellen Verfahren und Laser-Dekontamination

Das Verfahren der Laser-Dekontamination, wie es an der TU Dresden entwickelt wird, beruht auf dem Aufschmelzen der Betonoberfläche durch Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche. Der Energieeintrag erfolgt dabei kontinuierlich, der Laser wird nicht gepulst betrieben. Das Einbringen von Energie in tiefere Schichten erfolgt über Wärmeleitung. Zum Austragen der Schmelze wird ein gepulster Druckluftstrom auf das Schmelzbad gelenkt.

Im Vergleich zu konventionellen mechanischen Verfahren ergibt sich dadurch eine Reihe von signifikanten Vorteilen. Der Aufschmelz- und Abtragprozess erfolgt berührungslos und somit ohne Kraft-Wechselwirkung. Dadurch tritt kein Verschleiß am Werkzeug auf. Der Wartungsaufwand ist somit deutlich geringer einzuschätzen. Als weiterer Vorteil ergibt sich aus den geringeren mechanischen Kräften eine geringere Staubproduktion im Vergleich zu mechanischen Verfahren. Dadurch können Querkontaminationen vermieden werden, deren nachträgliches Entfernen einen zusätzlichen Aufwand bedeutet.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch das Fehlen von Rückstellkräften, welche auf das Trägergerät wirken. Dies erlaubt die Verwendung eines kompakten und leichten Trägergerätes. Dadurch ist es möglich, dieses Gesamtsystem autark zu steuern und in schwer zugänglichen Gebäudeteilen und in Räumen mit geringer Traglast einzusetzen.

Die Abbildung 1 zeigt einen qualitativen Vergleich der Optimierungspotenziale des Laser-Dekontaminationsverfahrens im Vergleich zu herkömmlichen mechanischen Verfahren.

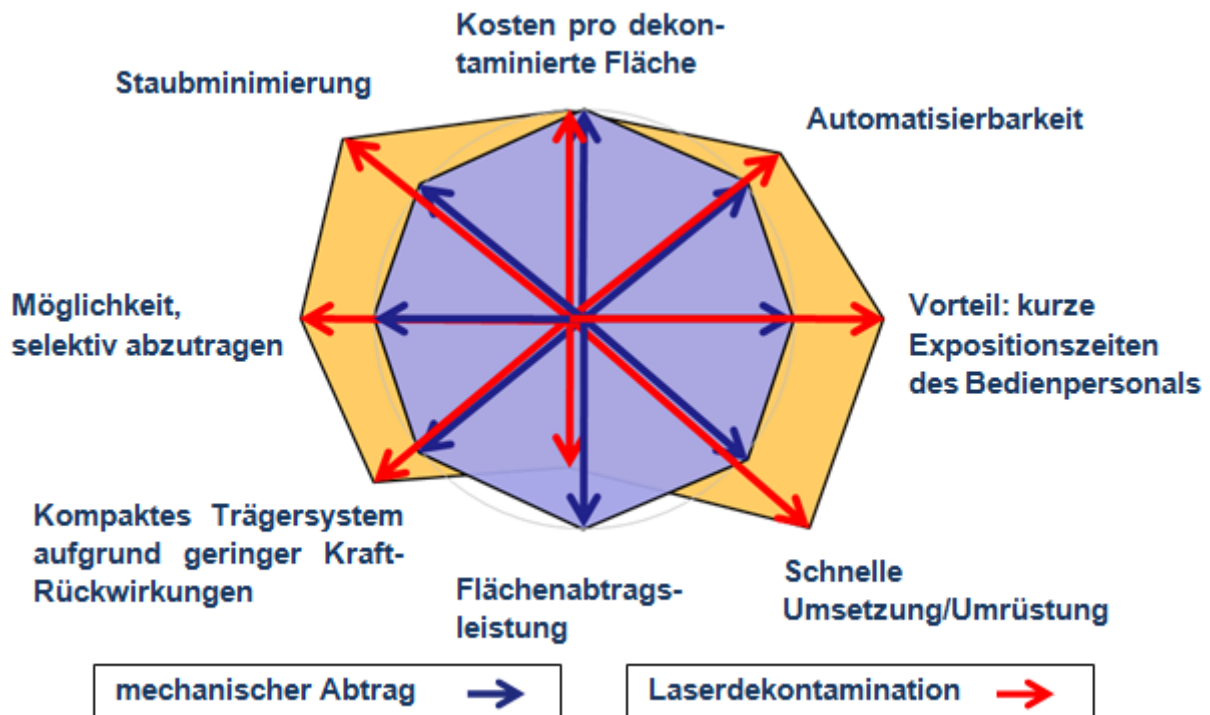


Abbildung 1: Vergleich des mechanischen Abtrags mit dem Laser-Dekontaminationsverfahren

Die verwendete Sensorik und das autark arbeitende Trägergerät erlauben die Automatisierung des Prozesses, so dass die Steuerung des Abtragprozesses durch Bedienpersonal direkt vor Ort entfällt. Dies führt zu einer Absenkung der Expositionszeiten für das Rückbaupersonal in den jeweiligen Bereichen. Die Möglichkeit der Fernhantierung erlaubt darüber hinaus, Umsetzungen zu beschleunigen und auf aufwendiges Einrüsten der Wandstrukturen zu verzichten, was ebenfalls zu einer Reduktion der Expositionszeiten des Personals führt. Aufgrund der Kompaktheit des Laserarbeitskopfes und des Trägergeräts ist es möglich, schwer zugängliche Stellen anzusteuern und zu bearbeiten. Gerade für Räume mit lokalen Belastungen bietet sich das Laser-Dekontaminationsverfahren als schnell einsetzbares Verfahren an.

Chemische Verfahren erfordern den Einsatz von Chemikalien und Wasser und generieren so erhebliche zusätzliche Abfallmengen. Die chemischen Verfahren werden zum Großteil zum

Reinigen von Rohrleitungen oder Bauteilen verwendet, auch können diese in entsprechende Lösungen getaucht werden. Diese Verfahren unterscheiden sich in ihren Anwendungsgebieten deutlich vom Verfahren der Laser-Dekontamination.

3. Definition der Anforderungen an die Laser-Dekontamination

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Laserdekontaminationssystems, welches, getragen von einem Manipulator, die Dekontaminationsarbeiten autark an einer Wand oder Decke durchführen kann. In Kapitel 2.4 wurden die Vorteile des Laser-Dekontaminationsverfahrens gegenüber konventionellen Verfahren herausgestellt. Um diese Vorteile zu realisieren, ist eine Reihe von Systemanforderungen notwendig, was in den folgenden Kapiteln dargestellt wird.

3.1. Technische Anforderungen an den Laser-Arbeitskopf

Der Laser-Arbeitskopf besteht aus zwei wesentlichen Teilen. Zum Einen sind dies der eigentliche Laser-Arbeitskopf und zum Anderen die vorangeschaltete Sensorik, welche das autarke Arbeiten unterstützen soll. Für eine Automatisierung des Prozesses sind eine umfangreiche Sensorik und eine Verarbeitung der Messsignale zwingend notwendig.

Über dem Laserarbeitskopf ist die Optik montiert, welche den Laserstrahl in ein Rechteckprofil umformt. Der Laserarbeitskopf umschließt den Laserstrahl und verhindert somit das Austreten von reflektierten oder gestreuten Laserstrahlen in die Umgebung. Sowohl durch reflektierte Strahlung als auch durch Strahlung des aufgeschmolzenen Betons kommt es zu einer Erwärmung des Arbeitskopfes. Diese mögliche Erwärmung des Arbeitskopfes ist bei der Auslegung und Wahl des Werkstoffes zu berücksichtigen.

Die zweite wesentliche Aufgabe ist das Ausblasen der Schmelze, also das Abheben der flüssigen Phase vom festen Untergrund. Dies wird mittels Druckluftdüsen realisiert. Die Düsen müssen so in den Arbeitskopf integriert sein, dass der Druckluftstrahl direkt auf das Schmelzbad gerichtet ist. Durch das Ausblasen treten keine relevanten mechanischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und abzutragender Wand auf. Dies verringert zum Einen die freigesetzte Staubmenge und ermöglicht zum Anderen, das Trägersystem für den Laser-Arbeitskopf deutlich kompakter auszulegen, als dies bei konventionellen Verfahren notwendig ist.

Die dritte Aufgabe ist das Absaugen der abgelösten Schmelzepartikel. Hierfür ist im Arbeitsraum ein Unterdruck zwingend erforderlich, um ein ungewolltes Austreten der Partikel nach außen zu vermeiden. Die Sensorik wird dem Laserprozess (örtlich) vorgeschaltet, da die zu

bearbeitende Fläche vorher abgescannt werden muss. Die einzelnen Aufgaben des Sensorsystems werden im folgenden Kapitel beschrieben.

3.2. Aufgaben des Sensorsystems

Die Aufgabe des Sensorsystems ist ein möglichst autarkes Arbeiten des manipulatorgesteuerten Laserdekontaminationssystems, sodass Störstellen und Hindernisse detektiert werden können, welche den Verfahrensablauf behindern könnten.

Das Sensorsystem muss dazu Objekte, die sich in der Vorschubrichtung vor dem Arbeitskopf befinden, erkennen. Desweiteren müssen metallische Gegenstände auf oder unmittelbar unter der Oberfläche detektiert werden, da diese den Verfahrensprozess behindern können. Gleichzeitig müssen Kanten, Durchbrüche und größere Bohrungen erkannt werden, da unter allen Umständen verhindert werden muss, dass Laserstrahlung unkontrolliert in einen Nachbarraum gelangt. Durch die hohe Leistung des Lasers bestünde dort Gefahr für Personal und Gegenstände. Die Erfassung der Oberflächengeometrie ermöglicht es, selektiv abzutragen. Die Auswahl und Verschaltung der einzelnen Sensoren wird in Kapitel 4.8 ausführlich erläutert.

3.3. Schnittstellen zwischen Manipulator und Laserarbeitskopf

Zu Beginn des Projekts wurden von beiden Projektpartnern die Anforderungen an das Gesamtsystems zusammengestellt. Diese umfassen das Schreiten und Versetzen des Manipulators, das Verfahren des Arbeitskopfes und den Abtrag des Betons. Da für beide Systeme eine einheitliche Gesamtsteuerung vorgesehen ist, wurden die Schnittstellen definiert und bei der Entwicklung des Trägergerätes und des Laserarbeitskopfes mit integriert.

Darüber hinaus betrifft es die Medienleitungen, welche für die Funktion des Laserarbeitskopfes notwendig sind. Sie werden mit dem Hauptversorgungsstrang zum Manipulator geleitet und von dort aus verteilt. Für den Laserarbeitskopf sind dies:

- der Absaugschlauch für die ausgetragenen Schmelzpartikel,
- die Druckluft für die Versorgung der Ausblasdüsen,
- das Lichtleitkabel für Übertragung der Laserleistung von der Laserquelle bis zur Optik auf dem Trägergerät sowie
- Vor- und Rücklauf für die Wasserkühlung der Optik.

Hinzu kommt die Stromversorgung für die einzelnen Sensoren sowie der Signalleitungen. Diese werden wie die Schnittstellen auf der programmatischen Ebene im Kapitel 4.8 erläutert.

Die Aufgaben für die Bewegungsabläufe und Steuerung des Gesamtprozesses wurden auf zwei unterschiedliche Steuereinheiten, die jeweils von den Projektpartnern programmiert wurden aufgeteilt. Der komplette Schreitvorgang und das Drehen des Manipulators werden allein durch die Manipulatorsteuerung realisiert. Das Absenken des Arbeitskopfes erfolgt im Zusammenspiel zwischen beiden Steuerungsteilen, hier sind in der Programmierung entsprechende Schnittstellen vorhanden. Der komplette Abtragprozess wird durch das Programm für den Laserarbeitskopf realisiert; dabei ist eine Schnittstelle für das Anhalten des Vorschubs bei evtl. Störungen integriert. Weitere Details zur Umsetzung dieser Anforderung sind im Kapitel 4.8 beschrieben.

3.4. Fernsteuerung / autarkes Arbeiten

Der Laserdekontaminationsprozess wird, sofern keine Störungen auftreten, autark durchgeführt. Dadurch kann die Expositionszeiten für das Personal so gering wie möglich gehalten werden. Ein Eingriff von außen ist über ein Touchpanel möglich. Dieses ermöglicht dem Bediener die Überwachung des Prozesses sowie der relevanten Messgrößen, wie dem Unterdruck in den Vakuumsaugplatten. Gleichzeitig sind Steuerungen, wie das Anhalten des Prozesses, das manuelle Versetzen des Manipulators oder Änderungen von Parametern, möglich.

4. Grundlegende Untersuchungen

Das Projekt Manola als Fortsetzung der Projekte LASABA greift die dort generierten Ergebnisse auf und entwickelt die Technologie weiter. Ein signifikanter Unterschied ist der erstmalige Einsatz eines Diodenlasers mit 10 kW Dauerstrahlleistung. In den vorangegangenen Projekten konnte eine maximale Laserleistung von 3 kW verwendet werden. Die damit verbundene deutliche Erhöhung der Abtragfläche pro Zeiteinheit ermöglicht die Verwendung eines rechteckigen Laserspots. Dies bedeutet aber gleichzeitig, dass nicht alle Ergebnisse aus LASABA I + II direkt übertragbar und zuerst neue Orientierungsversuche notwendig waren, um im Anschluss eine Auslegung des zu fertigenden Arbeitskopfes durchzuführen. In den folgenden Kapiteln wird zuerst, ausgehend vom Prinzip der Laserdekontamination, die Auslegung des Laserarbeitskopfes beschrieben. Es folgen die konstruktive-technische Umsetzung und die Versuche zu den erreichbaren Parametern des Laserdekontaminationsverfahrens sowie der erreichten Abtragfläche pro Zeiteinheit. In Kapitel 4.8 wird ausführlich die Auswahl der Sensorik für die in 3.2 beschriebenen Anforderungen sowie die Steuerung des Arbeitskopfes erläutert. Im Anschluss daran folgt die Beschreibung der programmatischen Umsetzung der Steuerung.

4.1. Auslegung des Arbeitskopfes

Das Prinzip der Laserdekontamination nach dem an der TU Dresden entwickelten Verfahren, basiert auf dem Aufschmelzen der Betonoberfläche durch Absorption der Laserenergie in der obersten Betonschicht. Beton besitzt einen hohen Absorptionskoeffizienten und eine sehr geringe Transmissionsrate. (Knorr, et al., 2006) (Herrmann, et al., 2009)

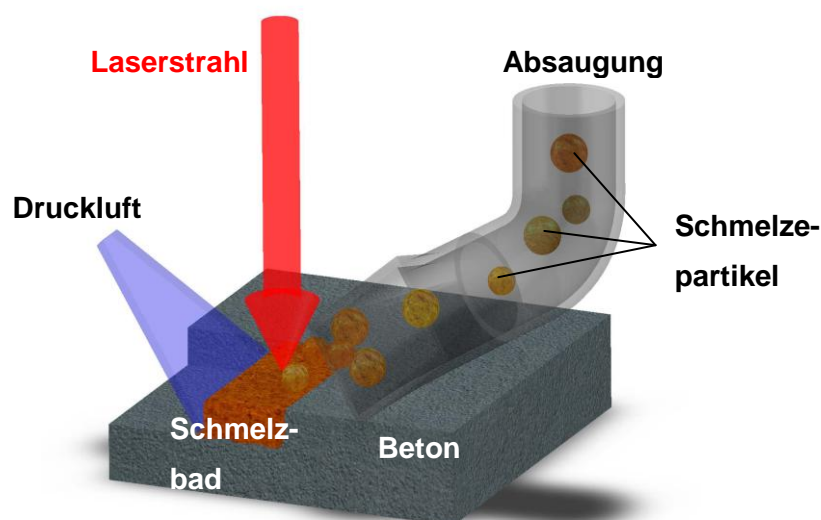


Abbildung 2: Prinzip der Laser-Dekontamination

Dies führt dazu, dass der Bereich direkt an der Oberfläche sehr stark erhitzt wird und es möglich ist, diesen aufzuschmelzen. Bei einer höheren Transmission würde mehr Energie in tiefere Schichten gelangen und das Aufschmelzen an der Oberfläche wäre weniger effizient. Wird die Einwirkzeit des Lasers erhöht, wird dem Schmelzbad mehr Energie zugeführt und durch Wärmeleitvorgänge schmilzt tieferliegendes Material auf. Somit ist ein Abtrag auch von dickeren Schichten grundsätzlich möglich. Da der Energieeintrag über Wärmeleitung jedoch im Vergleich zum Energieeintrag über Laserstrahlung ein „langsamer“ Prozess ist, sind Abtragtiefen > 5 mm nicht effizient. Ein mehrfach wiederholtes Abtragen ist dann deutlich effizienter.

Durch gepulste Druckluft wird die entstandene Schmelze aus dem Schmelzbad ausgetragen. Die hohe kinetische Energie des Luftstrahls löst die flüssige Phase von dem darunter liegenden festen Material. Hohe Absauggeschwindigkeiten führen zur schnellen Abkühlung der abgelösten Schmelzetropfen und zur Bildung kugelförmiger Schmelzpartikel, die aufgrund ihres geringen Volumens schnell weiter abkühlen und vollständig erstarren. In diesen wird ein Großteil der radioaktiven Nuklide fixiert werden. (Herrmann, et al., 2009)

Für die Entwicklung des Systems MANOLA wird ein 10 kW Diodenlaser der Firma Laserline verwendet. Die verwendete Optik der Firma Laserline ermöglicht es, den Laserstrahl rechteckig umzuformen. Hierfür stehen verschiedene Brennweiten und Formen zur Verfügung (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: mögliche Brennweiten und Strahlformen des 10 kW Diodenlasers

Brennweite	Form 1	Form 2	Form 3
200 mm	(13 x 23) mm ²	(5 x 23) mm ²	(5 x 45) mm ²
300 mm	(19 x 34) mm ²	(8 x 34) mm ²	(8 x 68) mm ²
400 mm	(26 x 46) mm ²	(10 x 45) mm ²	(10 x 90) mm ²
500 mm	(32 x 57) mm ²	(13 x 57) mm ²	(13 x 113) mm ²

Die Optik bietet eine gute Strahlqualität mit einer homogenen Energieverteilung für den kompletten Strahlquerschnitt im Fokus. Dies ermöglicht ein gleichmäßiges Aufschmelzen der Betonoberfläche ohne große Gradienten in den Randbereichen.

Die Versuche im Rahmen des Projektes LASABA zeigten, dass Schmelzpartikel gegen die Optik geschleudert werden können und sich dort ablagern und einbrennen. Deshalb muss zwischen Strahlaustritt aus der Optik und der zu bearbeitenden Oberfläche ein Mindestabstand eingehalten werden um so eine vollständige Absaugung zu gewährleisten. Die

Auslegung des Arbeitskopfes erfolgte somit für die Optik mit der Brennweite 400 mm und einer Strahlform von (10 x 45) mm² im Fokus.

Ausgehend von den in AP 1 (Technische Anforderungen an den Laserarbeitskopf, siehe 3.1) definierten Anforderungen wurde ein Konzept für einen Laserarbeitskopf in Kompakt-Bauweise erstellt. Im Rahmen des Projektes LASABA II wurde ein Arbeitskopf für die Arbeiten mit einem 3 kW Laser entwickelt, welcher über einen runden Spot mit einem Durchmesser von 1,3 cm verfügt. Die Absaugung erfolgte unter Ausnutzung des Coanda-Effekts konzentrisch um den Laserstrahl. Aufgrund der neuen rechteckigen Geometrie des Laserstrahls war das Design grundlegend neu zu gestalten.

Das Ausblasen der Schmelze erfolgt, wie schon bei der Düse im Projekt LASABA, in Vor-schubrichtung des Arbeitskopfes. Partikel, welche sich hinter dem Schmelzbad absetzen, werden bei Fortschreiten des Prozesses noch einmal bearbeitet und somit von der Oberfläche endgültig entfernt. Dies führt zu einer Minimierung von Sekundärkontaminationen. Die Absaugung erfolgt direkt gegenüber dem Abtragsort, so dass ein Großteil der Schmelze direkt in die Absaugung gelangt. Das Schema der Grundversion ist in Abbildung 3 dargestellt.

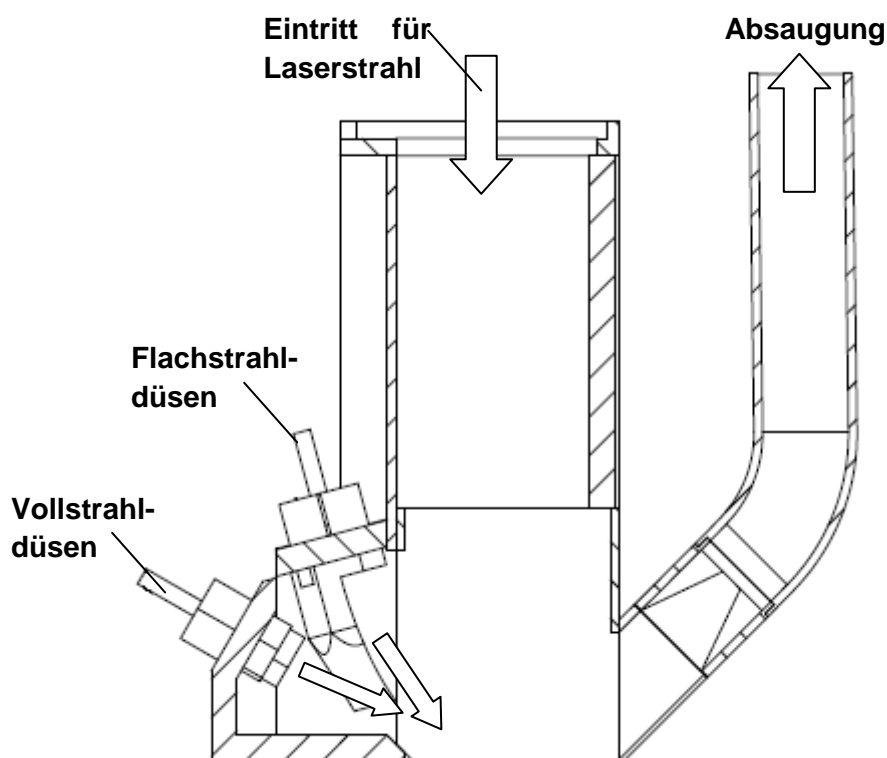


Abbildung 3: schematische Darstellung der Grundversion des Laserarbeitskopfes

Für das Ausblasen der Schmelze wurden in der ersten Version zwei verschiedene Düsentypen in Doppelanordnung vorgesehen (Abbildung 4). Seitlich sind zwei Vollstrahldüsen angeordnet, um die Ränder des Schmelzbades mit Druckluft zu beaufschlagen und der Bildung einer Wulst entgegen zu wirken. Die mittigen Strahldüsen erzeugen einen flachen Luftstrahl, welcher sich mit zunehmender Länge mit einem Winkel von 45° auffächert. Der Abstand und die Anordnung der beiden Düsen sind so gewählt, dass sich die beiden Luftstrahlen leicht überlappen und die gesamte Breite des Schmelzbades abdecken. Beide Vollstrahldüsen treffen in einem Winkel von 30° zur Betonoberfläche auf das Schmelzbad. Für die Flachstrahldüsen wurde ein Winkel von 45° als optimal ermittelt.

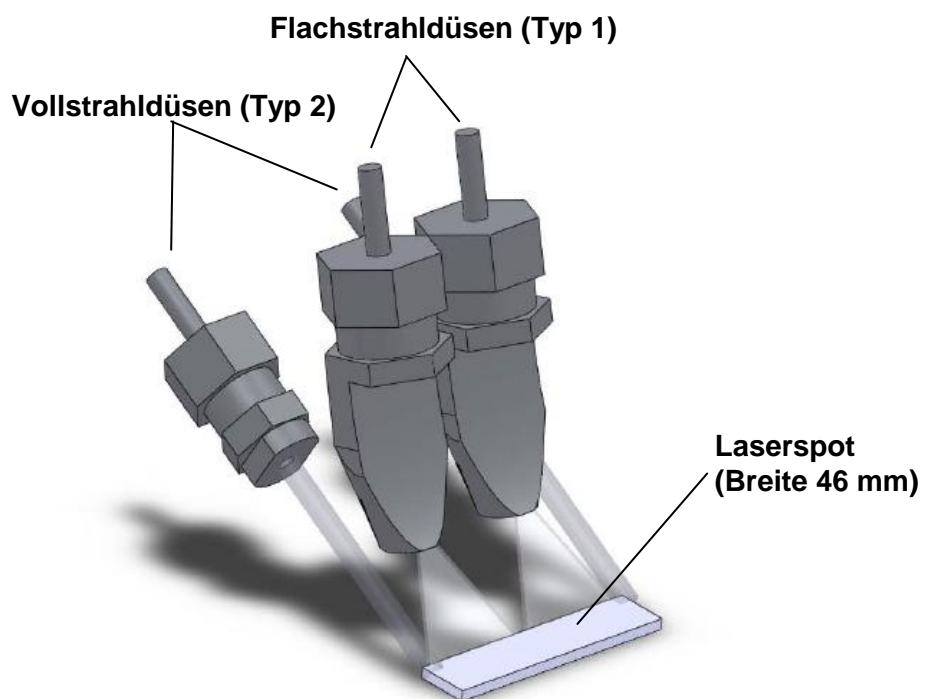


Abbildung 4: Anordnung der Ausblasdüsen und Druckluftstrahl

Nach der Erstellung eines ersten Konzepts und der Wahl der Düsen, wurde dieses Modell in den CFD-Code Ansys CFX übertragen und eine Modellierung der Strömungsverhältnisse im Arbeitskopf durchgeführt. Ziel war es, die Strömung im Arbeitskopf zu optimieren und insbesondere große Verwirbelungen im Abströmbereich auszuschließen. Nach Interaktion mit der Schmelze sollen die Druckluft und die ausgetragenen Schmelzpartikel direkt aus dem Inneren abgeführt werden, so dass sich keine Partikel in den Randzonen absetzen oder in Richtung Optik geschleudert werden können.

4.2. Bau des Arbeitskopfes

Nach erfolgter Auslegung und Optimierung mittels mathematischer Simulation wurden die Einzelteile des Arbeitskopfes konstruiert. Dabei wurde darauf geachtet, einzelne Komponenten wie Düsenhalterungen oder Absaugung modular aufzubauen, um spätere Modifikationen, ohne kompletten Neubau des Arbeitskopfes, realisieren zu können. Der Arbeitskopf ist aus Gründen der Gewichtsersparnis aus Aluminium gefertigt. Lediglich innen, um den Bereich des Laserspots, wurde eine Auskleidung aus Stahl angebracht. An dieser Stelle ist aufgrund der Reflektion und Streuung des Lasers sowie durch Strahlungswärme des Schmelzbades mit einer höheren thermischen Belastung zu rechnen. Der restliche Arbeitskopf wird durch die eingedüste Druckluft und die Absaugung ausreichend stark gekühlt. Darüber hinaus haftet die Betonschmelze an einer Stahloberfläche deutlich schlechter als an einer Aluminiumoberfläche.

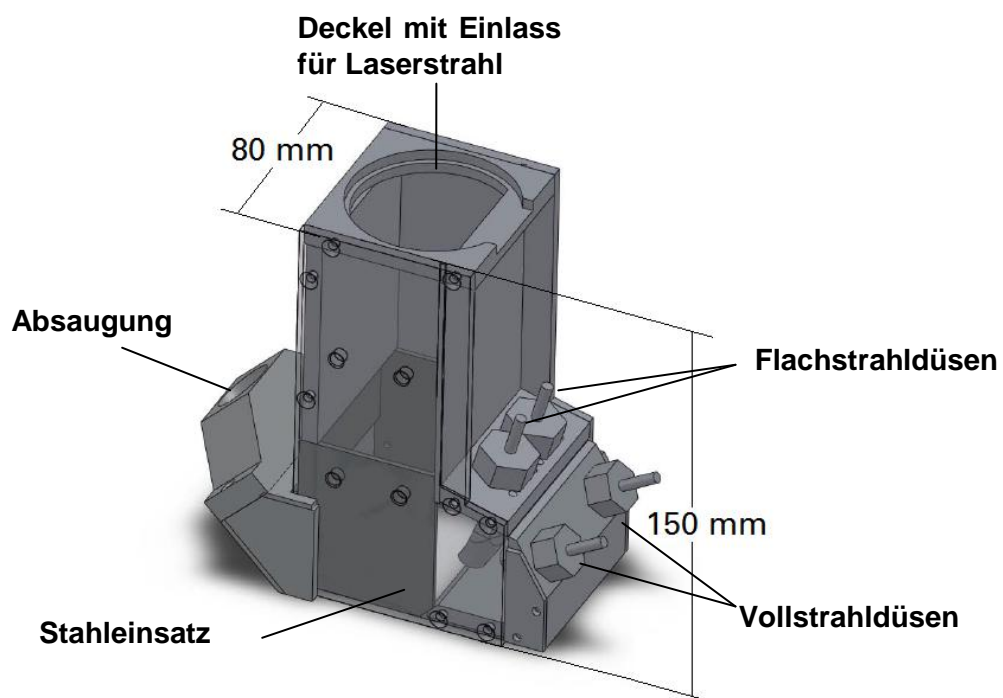


Abbildung 5: perspektivische Darstellung des Arbeitskopfes für die Abtragversuche (Grundversion)

Der Arbeitskopf hat eine Gesamtbreite von ca. 80 mm und eine Höhe von ca. 150 mm. Der Durchmesser des Stahleinsatzes beträgt 62 mm. Somit ergeben sich 8 mm Abstand zwischen Schmelzbad (46 mm) und Seitenwand. Mit dieser Grundversion wurden die Versuche zum Laserabtrag durchgeführt, die im folgenden Kapitel beschrieben werden. Die aus den Versuchen abgeleiteten Verbesserungen am Arbeitskopf werden ebenfalls dort beschrieben.

4.3. Parametervariation

Für die Versuche wurde ein Diodenlaser mit einer Strahlleistung von maximal 10 kW verwendet. Eine optische Umformeinheit bildet den mittels Glasfaser übertragenen kreisrunden Laserstrahl im Fokus als Rechteck auf der bestrahlten Oberfläche ab. Im Bereich der Brennweite besitzt der Laserstrahl eine nahezu homogene Energieverteilung über den gesamten Querschnitt.

Im Gegensatz zur späteren realen Anwendung wird im Labor nicht der Arbeitskopf über den Beton bewegt, sondern der Betonstein unter dem Arbeitskopf verfahren. Arbeitskopf und Laseroptik sind fest montiert und passend zueinander ausgerichtet. Als Betonsteine wurden Probekörper mit den in LASABA untersuchten Zusammensetzungen verwendet. (Herrmann, et al., 2009) Eingesetzt wurde Beton mit reinem quarzitischem und mit gemischt-quarzitisch-calcitischem Zuschlag. Der Beton wurde auf einem Tisch montiert, welcher über eine X-Z-Achse bewegt wird (Abbildung 6). Die Absaugung erfolgt über einen Industriesauger, dazwischen ist ein Filter mit verschiedenen Siebstufen geschaltet. Somit kann nach den Versuchen die Partikelgrößenverteilung analysiert werden.

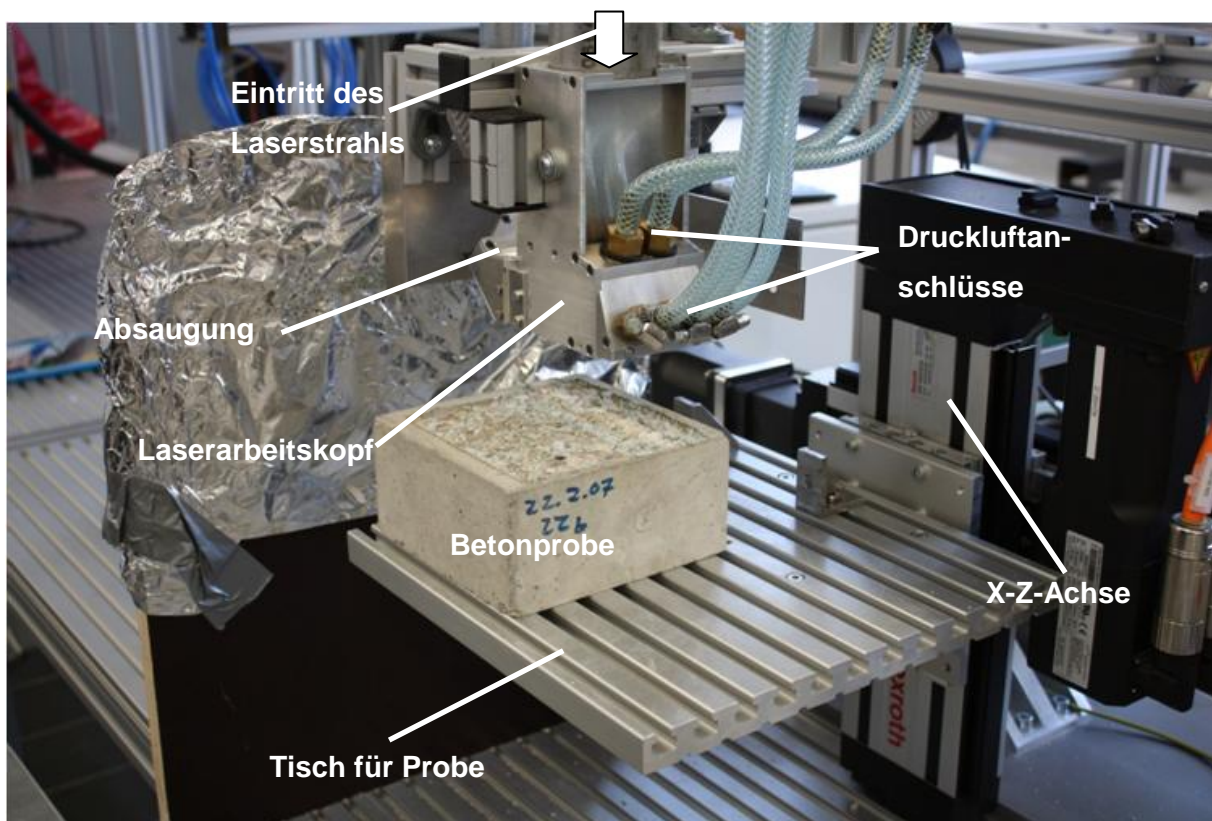


Abbildung 6: Versuchsaufbau für Abtragversuche (Laserarbeitskopf hoch gefahren)

In den folgenden Versuchen wurden verschiedene Einflussparameter variiert. Für den Laserabtragprozess sind die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit und der Ausblasdruck von entscheidender Bedeutung.

Versuchsreihe 1

Der erste Versuch wurde mit einer Leistung von 5 kW Strahlleistung durchgeführt, um die Funktionalität des Laserarbeitskopfes zu testen. Der Druck für die Ausblasdüsen wurde auf 0,4 MPa eingestellt. Verwendet wurden alle vier in Kapitel 4.1 beschriebenen Düsen. Als Pulsdauer für die Druckluft wurden 10 ms, bei einer Pause von 100 ms zwischen den Pulsen, eingestellt. Die verwendeten Parameter sind zusammengefasst in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Parameter der Versuchsreihe 1

Versuch Bez.	Leistung	Druck Düse 1	Druck Düse 2	Puls Düse 1	Puls Düse 2	Pause Düse 1	Pause Düse 2	Vorschub
S01-01	5 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	100 ms	100 ms	200 mm/min
S01-02	5 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	100 ms	100 ms	200 mm/min

Die Ergebnisse beider Versuche lassen sich gut untereinander vergleichen. Es zeigt sich, dass das Aufschmelzen des Betons über die gesamte Breite des Laserspots sehr gut homogen ist. Das Schmelzbad hat dabei eine Tiefe von 2 – 3 Millimetern. Bei diesen ersten Versuchen verblieb jedoch noch ein erheblicher Anteil von Restschmelze auf der Oberfläche (siehe Abbildung 7).

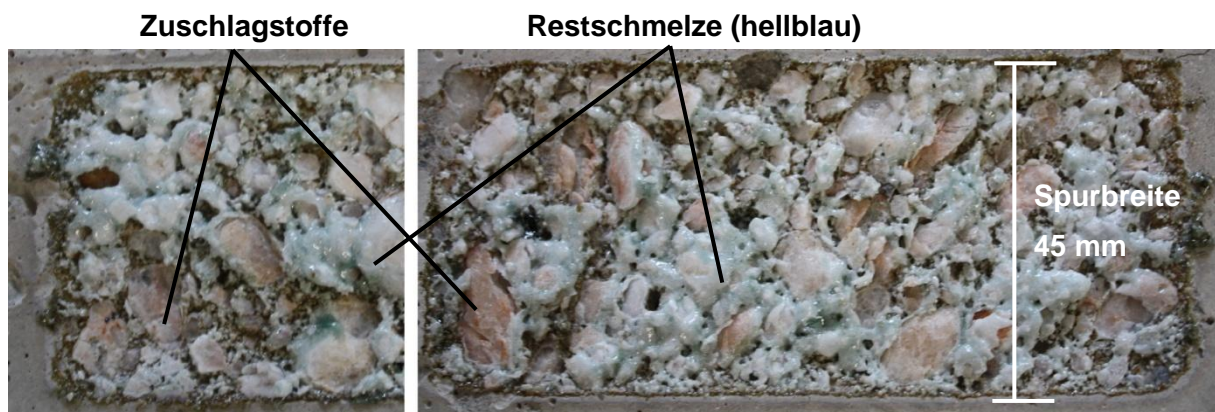


Abbildung 7: Spuren der Versuche S01-01 (links) und S01-02 (rechts)

Diese erste Versuchsreihe diente dem Testen des Gesamtsystems und wurde nicht mit maximaler Leistung durchgeführt. Darüber hinaus diente sie als Vergleichswert zur weiteren

Optimierung. Nach dem Erfolg dieser Tests, wurden im Folgenden der Einfluss der einzelnen Parameter Laserleistung, Vorschub, Ausblasdruck, Ausblasdauer und Pausendauer zwischen zwei Druckluftpulsen auf die Abtragfläche pro Zeiteinheit und -qualität untersucht.

Versuchsreihe 2

In der folgenden Versuchsserie wurde der Einfluss der Laserleistung auf die Abtragergebnisse untersucht. Hierfür wurden dieselben Parameter wie in der ersten Versuchsserie verwendet und lediglich die Laserleistung variiert (Tabelle 6).

Tabelle 6: Parameter der Versuchsreihe 2a (Variation der Laserleistung)

Versuch Bez.	Leistung	Druck Düse 1	Druck Düse 2	Puls Düse 1	Puls Düse 2	Pause Düse 1	Pause Düse 2	Vorschub
S02-01	5 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	100 ms	100 ms	200 mm/min
S02-02	7 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	100 ms	100 ms	200 mm/min
S02-03	9 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	100 ms	100 ms	200 mm/min

Eine höhere Laserleistung führt, mit dem damit verbundenen höheren Energieeintrag pro Fläche, zu einem tieferen Aufschmelzen und somit auch zu einer höheren Produktion von Schmelze. Im dritten Versuch bei einer Leistung von 9 kW betrug die Tiefe des Schmelzbaues bis zu fünf Millimeter. Dies führte dazu, dass noch mehr Schmelze nicht ausgetragen werden konnte, auf der Oberfläche verblieb und wieder erstarre (Abbildung 8).



Abbildung 8: Abtragversuche der Versuchsreihe 2

Das Ziel des Laserabtrags ist die komplette Entfernung des aufgeschmolzenen Oberflächenmaterials. Dies wird durch die Druckluftstrahlen realisiert. Als Parameter lassen sich hier Druck, Pulsdauer und die Pause zwischen zwei Druckluftstößen variieren. Das Ziel der folgenden Versuche war es, den Austrag der Schmelze von der Oberfläche zu verbessern. Hierfür wurden in einem ersten Schritt die Pausen zwischen zwei Druckluftstößen verkürzt (S02-04 und S02-05). Im dritten Versuch (S02-06) wurde der Vorschub erhöht.

Tabelle 7: Parameter der Versuchsreihe 2b

Versuch Bez.	Leistung	Druck Düse 1	Druck Düse 2	Puls Düse 1	Puls Düse 2	Pause Düse 1	Pause Düse 2	Vorschub
S02-04	9 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	50 ms	50 ms	200 mm/min
S02-05	9 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	50 ms	50 ms	200 mm/min
S02-06	9 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	10 ms	10 ms	50 ms	50 ms	400 mm/min

In den beiden ersten Versuchen bewirkte die Änderung der Pausenzeit nur eine geringe Verbesserung. Aus diesem Grund wurde im folgenden Versuch der Vorschub erhöht und somit die pro Fläche eingebrachte Energie gesenkt. Wie erwartet, führte dies zu einer geringeren Tiefe des Schmelzbades. Dies führte dazu, dass der größte Teil der Schmelze durch die Druckluftimpulse von der Oberfläche entfernt werden konnte.

Versuchsreihe 3

Im Anschluss wurde in einer dritten Versuchsreihe der Einfluss des Ausblasdruckes auf den Abtrag der Schmelze untersucht. Hierfür wurde der Druck schrittweise von 0,4 auf 0,7 MPa erhöht. Im Vergleich zur Serie 2b wurde im ersten Versuch der Druck konstant gehalten, jedoch mit einer kürzeren Pulsdauer gearbeitet. Die folgenden Versuche S03-04 bis S03-07 wurden wieder mit einer Pausenzeit von 100 ms durchgeführt. Diese vier Versuche wurden alle mit den gleichen Parametern durchgeführt, um aufzuzeigen, dass die erreichten guten Abtragungsergebnisse reproduzierbar waren. Die Parameter sind zusammengefasst in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Parameter der Versuchsreihe 3

Versuch Bez.	Leistung	Druck Düse 1	Druck Düse 2	Puls Düse 1	Puls Düse 2	Pause Düse 1	Pause Düse 2	Vorschub
S03-01	9 kW	0,4 MPa	0,4 MPa	5 ms	5 ms	50 ms	50 ms	400 mm/min
S03-02	9 kW	0,5 MPa	0,5 MPa	5 ms	5 ms	50 ms	50 ms	400 mm/min
S03-03	9 kW	0,7 MPa	0,7 MPa	5 ms	5 ms	50 ms	50 ms	400 mm/min
S03-04	9 kW	0,7 MPa	0,7 MPa	5 ms	5 ms	100 ms	100 ms	400 mm/min
S03-05	9 kW	0,7 MPa	0,7 MPa	5 ms	5 ms	100 ms	100 ms	400 mm/min
S03-06	9 kW	0,7 MPa	0,7 MPa	5 ms	5 ms	100 ms	100 ms	400 mm/min
S03-07	9 kW	0,7 MPa	0,7 MPa	5 ms	5 ms	100 ms	100 ms	400 mm/min

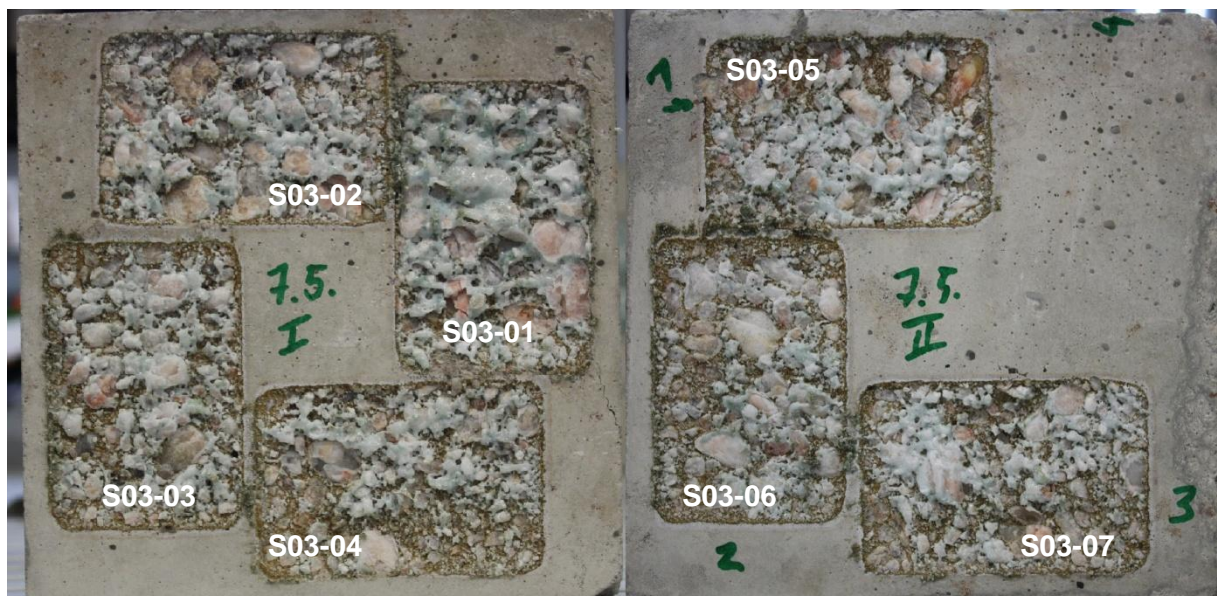


Abbildung 9: Abtragversuche der Versuchsreihe 3

Als Ergebnis der dritten Versuchsreihe lässt sich zusammenfassen, dass der Ausblasdruck einen Mindestwert erreichen muss, um die Schmelze von der Oberfläche hinreichend vollständig abzulösen. Mit dem im Labor verfügbarem Maximal-Druck von 0,7 MPa lassen sich sehr gute Ergebnisse erzielen. Eine zweite wesentliche Verbesserung ist die Verkürzung der Pulsdauer auf 5 Millisekunden. Ein möglichst kurzer Druckluftstoß ist für das Abtragen der Schmelze vollkommen ausreichend. Längere Pulsdauern haben einen negativen Einfluss auf den Abtrag. Ebenso erwies sich die Erhöhung des Vorschubs auf 400 mm/min als zweckmäßig. Durch den geringeren Energieeintrag pro Fläche bildet sich weniger flüssige

Schmelzphase. Diese kann mit den experimentell ermittelten Parametern von 5 ms Pulsdauer und 100 ms Pause zwischen den Pulsen gut ausgetragen werden.

Versuchsreihe 4 – Einfluss der Druckluftdüsen

Gegenstand der Untersuchungen der vierten Versuchsreihe war die Wirkung der einzelnen Düsen. Verwendet wurden die zuvor ermittelten Parameter. Im ersten Versuch wurden nur die Flachstrahldüsen verwendet. Nach der ursprünglichen Konzeption deckten diese die Breite des Schmelzbades und die Vollstrahldüsen die Ränder ab. Im ersten Versuch S4-01 zeigte sich, dass der Austrag der Schmelze selbst in der Mitte deutlich schlechter war, wenn lediglich die Flachstrahldüsen zum Einsatz kamen. Die Vollstrahldüsen hatten somit einen großen Einfluss auf die Oberflächenqualität. Erklärbar ist dies mit dem Auffächern des Luftstrahls und dem damit verbundenen Druckverlust im Luftstrahl bis zum Auftreffen auf das Schmelzbad.

Tabelle 9: Parameter der Versuchsreihe 4

Versuch Bez.	Leistung	Druck Düse 1	Druck Düse 2	Puls Düse 1	Puls Düse 2	Pause Düse 1	Pause Düse 2	Vorschub
S04-01	9 kW	0,7 MPa	---	5 ms	---	100 ms	---	400 mm/min
S04-02	9 kW	0,7 MPa	0,7 MPa	5 ms	5 ms	100 ms	100 ms	400 mm/min
S04-03	9 kW	---	0,7 MPa	---	5 ms	---	100 ms	400 mm/min

Im zweiten Versuch wurden beide Düsentypen eingesetzt. Dabei wiederholten sich die Ergebnisse, wie sie schon in der dritten Versuchsreihe (bei den gleichen Parametern) auftraten. Aus diesem Grund wurden in einem dritten Versuch nur die äußeren Vollstrahldüsen verwendet. Hier zeigte sich, dass deutlich mehr Schmelze an den Seiten ausgetragen wurde und die Oberfläche dort nahezu komplett frei von Schmelze war. Dies führte jedoch erwartungsgemäß zu einer größeren Ansammlung von Restschmelze in der Mitte.



Abbildung 10: Spur aus Versuchsreihe S04-03 mit Schmelzeansammlung in der Mitte

Neben den oben aufgeführten Ergebnissen fiel in einigen Versuchen auf, dass während des Ausblasens Partikel zwischen Arbeitskopf und Oberfläche nach außen geschleudert wurden. Aus diesem Grund wurde eine Modifikation der Absaugung vorgenommen und eine dritte Vollstrahldüse zwischen den beiden äußeren installiert, um den Abtrag der Schmelze weiter zu optimieren.

Modifikation des Arbeitskopfes im Bereich der Absaugung

Die ursprüngliche Absaugung befand sich direkt am Ende des Arbeitskopfes um 45 ° nach oben gerichtet (vgl. Abbildung 11 – rot umrandet). An dieser Stelle wurde ein Zwischenstück eingebaut, um den Absaugstrom über eine größere Distanz parallel zur Betonoberfläche zu führen. Auf diese Art sollte ein Großteil der Partikel in die Absaugung gelangen und aus dem Bearbeitungsbereich abgeführt werden.

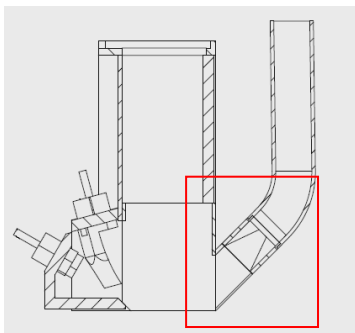


Abbildung 11: schematische Darstellung der Grundversion des Laserarbeitskopfes

Die Versuche zeigten aber keine nennenswerte Verbesserung. Es wurden weiterhin Partikel unter der Absaugung hindurch geschleudert. Aus diesem Grund wurde für den Arbeitskopf eine zweite Änderung vorgenommen. An den Seiten und vor der Absaugung erfolgte die Montage von Bürsten aus Edelstahl. Diese sind auf Federn gelagert und können sich somit

kleineren Kanten oder anderen Konturänderungen anpassen. Durch den direkten Kontakt zwischen Bürste und Betonoberfläche können die Partikel nicht mehr nach außen gelangen.

Versuche mit modifizierten Ausblasdüsen

Die zweite Modifikation betraf die Verwendung der Vollstrahldüsen. Die vorangegangenen Versuche zeigten, dass diese trotz ihres geringen Strahldurchmessers die Schmelze sehr gut von der Oberfläche ablösen. Zwischen den beiden äußeren Düsen wurde eine dritte Düse in der Mitte angebracht. Dies führte zu einer signifikanten Verbesserung in der Qualität der bearbeiteten Oberfläche.

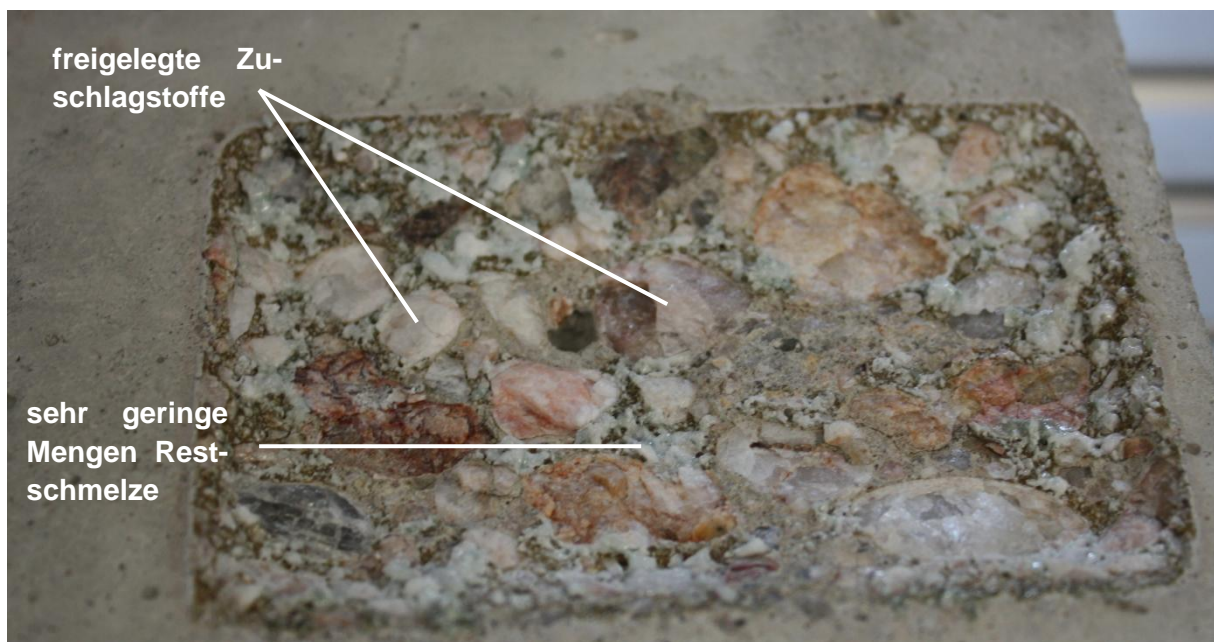


Abbildung 12: Laser-Spur unter Verwendung aller drei Vollstrahldüsen und der beiden Flachstrahldüsen

Die mit dem so modifizierten Laserarbeitskopf erreichte Abtragqualität und –quantität entspricht in vollem Umfang der Zielstellung.

4.4. Versuche zum Einfluss von metallischen Objekten an der Oberfläche

Eine wesentliche Aufgabe des Sensorsystems ist das Erkennen metallischer Objekte auf oder knapp unter der Oberfläche. Dies ist erforderlich, um ein Aufschmelzen größerer Metallobjekte und ein damit verbundenes unerwünschtes Versprühen des Metalls durch die Wechselwirkung mit der Laserstrahlung zu vermeiden. Dennoch ist es von Interesse zu untersuchen, ob und wie sich Metallanteile im Reaktionsbereich auf den Abtragprozess auswirken. Hierfür wurde ein Betonprobestein mit Schrauben und Nägeln verschiedener Größen präpariert und im Anschluss bearbeitet. Verwendet wurden dabei die unter 4.3 ermit-

telten Parameter. Die Abbildung 13 zeigt den präparierten Stein vor der Bearbeitung. Die größeren Schrauben besitzen einen Kopfdurchmesser von ca. 1 cm. Auf der rechten Seite sind eine kleinere Schraube sowie zwei Nägel (Durchmesser ca. 1 mm) zu erkennen.

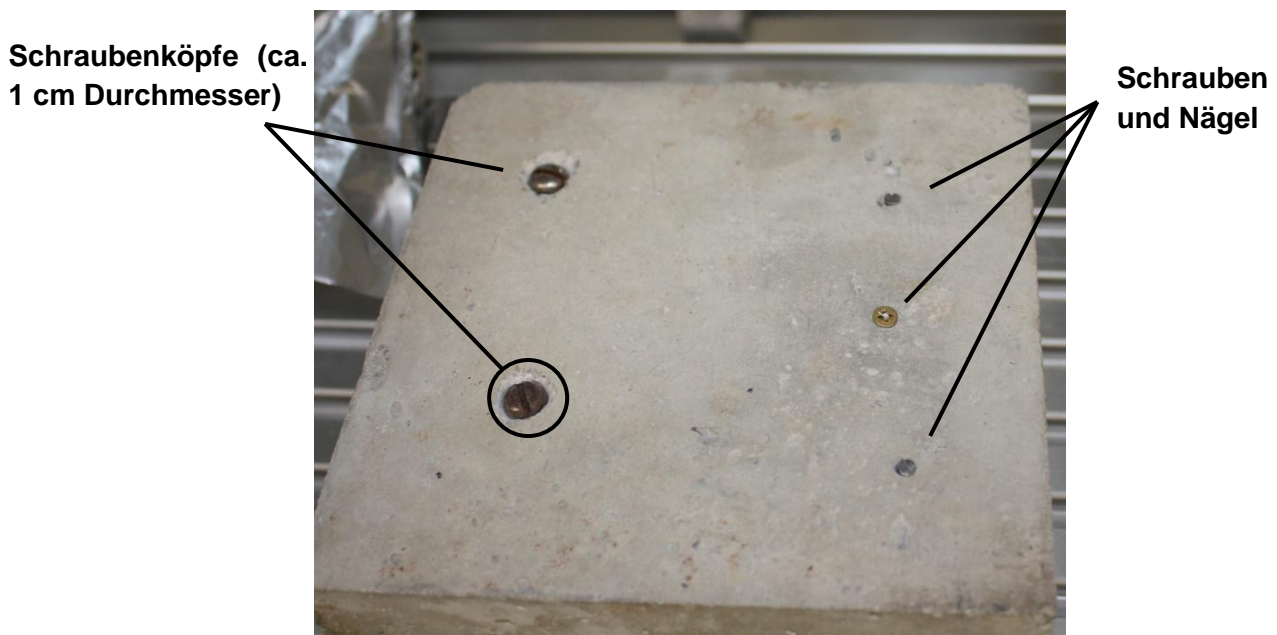


Abbildung 13: mit Schrauben und Nägeln präparierter Betonstein

Die Versuche zeigten, dass das Überfahren und Bearbeiten eines metallischen Gegenstandes dieser Größe problemlos möglich ist. Der Beton um die Schraube herum ließ sich abtragen. Allerdings reagiert das Material der Schraube sehr intensiv. Das geschmolzene Metall verteilt sich an der Oberfläche. Im Anschluss wurde dieser Bereich noch einmal überfahren, um zu testen ob ein Abtrag des geschmolzenen Materials möglich ist. Dies führte zu einer großflächigeren Verteilung der Rest-Metall-Schmelze.

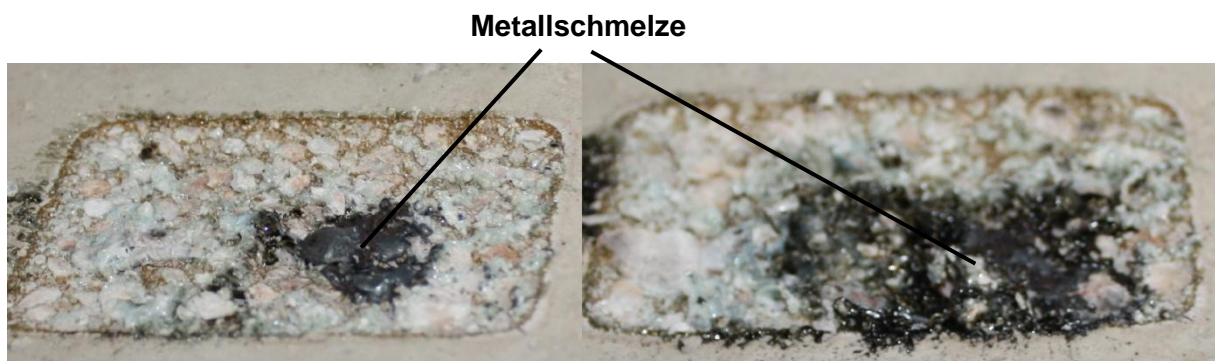


Abbildung 14: links: Schraube (eingekreist in Abbildung 13) nach 1. Bearbeitungsschritt; rechts: Schraube nach 2. Bearbeitungsschritt

Beim Bearbeiten der kleineren Metallobjekte konnte hingegen kein Einfluss auf das Abtragsergebnis festgestellt werden. Die Nägel wurden mit der Betonoberfläche abgetragen und es verblieben keine Reste an der Oberfläche.

4.5. Test mit Originalbeton aus dem KKW Würgassen

Die E.ON Kernkraft GmbH stellte für Versuche mit Originalbeton zwei nichtkontaminierte Proben aus dem KKW Würgassen zur Verfügung. Diese hatten die Maße 30 x 30 x 20 cm³. Am Institut für Baustoffe der TU Dresden wurden die Proben in ca. 15 x 15 x 10 cm³ große Teile zerlegt und die, durch Kernbohrungen wellige, Rückseite begradigt.

Für die Versuche wurden die im Vorfeld als optimal ermittelten Parameter von 200 mm/min und 400 mm/min Vorschub sowie die maximale Laserleistung von 10 kW eingestellt. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Parameter zu Versuchen mit Proben aus dem KKW Würgassen

Vorschub	Laserleistung	Ausblasdruck	Pulsdauer	Pulspause
200 mm/min	10 kW	0,7 MPa	5 ms	100 ms
400 mm/min	10 kW	0,7 MPa	5 ms	100 ms

Wie in den vorangegangenen Untersuchungen im Projekt LASABA II ermittelt, hat die Zusammensetzung des Betons einen großen Einfluss auf das Schmelzverhalten der Betonoberfläche. Je höher der Anteil der quarzitischen Bestandteile in den Zuschlagstoffen ist, desto mehr flüssige Schmelzphase bildet sich aus. Analysen an den Proben aus dem KKW Würgassen zeigten, dass diese einen hohen Anteil an calcitischen Bestandteilen beinhalten. Dies führt zu einer geringeren Bildung von Betonschmelze. Infolge der Freisetzung von CO₂ (deutlich unterhalb der Schmelztemperatur des Betons) werden Teile des Betons an der Oberfläche abgesprengt bevor sie aufschmelzen können.



Abbildung 15: Laser bearbeitete Betonprobe aus dem KKW Würgassen

Die erreichten Ergebnisse bezüglich Abtragfläche pro Zeiteinheit und Abtragtiefe sind vergleichbar mit denen aus den Versuchen mit den „synthetischen“ Probekörpern aus calcitisch-quarzitisch-gemischten Zuschlagstoffen. Unterschiede sind in der Form des ausgetragenen Materials erkennbar. Durch den höheren calcitischen Anteil ist die Menge an nicht aufgeschmolzenem Beton größer als in den vorangegangenen Versuchen. Die erreichte Abtragtiefe für die beiden verwendeten Vorschubgeschwindigkeiten ist aus der Abbildung 16 zu erkennen. Sie beträgt für eine Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min ca. 8 mm und für eine Vorschubgeschwindigkeit von 400 mm/min ca. 5 mm.

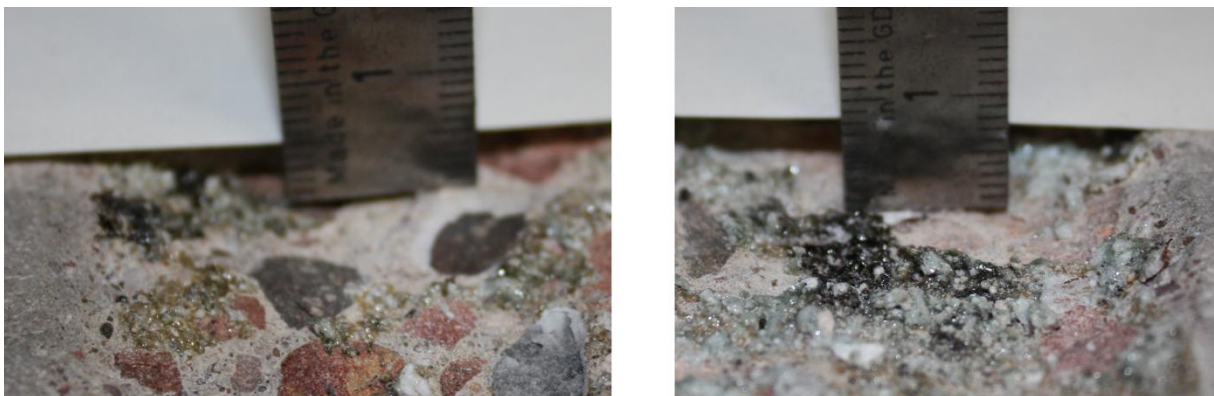


Abbildung 16: Abtragtiefe; links: mit 400 mm/min Vorschub, rechts: mit 200 mm/min Vorschub

Vergleiche zwischen den verwendeten Probekörpern und den Proben aus dem KKW Würgassen zeigen, dass bei gleichen Parametern ähnliche Ergebnisse sowohl bei der Abtragfläche pro Zeiteinheit, wie auch bei der Abtragtiefe realisierbar sind. Letztendlich sind die Ergebnisse für calcitischen Beton im Hinblick auf die Qualität der Oberfläche günstiger

als bei calcitisch-quarzitisch-gemischtem Beton. Durch die geringere Menge an Schmelze stellt sich eine gleichförmige Oberfläche ein.

Aufgrund der geringeren Schmelzebildung ist der Tiefenabtrag etwas höher.

4.6. Temperaturfelder im Beton während der Laserbearbeitung

Um Aussagen über die zu erwartenden Temperaturfelder während des Laserdekontaminationsprozesses zu treffen, wurden Versuche zur Messung der Temperaturverteilung im Beton durchgeführt. Das Ziel der Experimente war es, Aussagen über den Wärmetransport durch Leitung in den Beton zu gewinnen, um so den Einfluss der Laserbearbeitung auf die allgemeine Stabilität der Wand abschätzen zu können. In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Temperaturverteilung auf der Oberfläche gemessen. Der Hersteller der Saugplatten des Geräteträgersystems garantiert die Dichtigkeit nur bis zu einer Einsatztemperatur von 60 °C. Parallel zu den Versuchen wurde die Temperatur des Arbeitskopfes erfasst.

4.6.1. Wärmeeintrag in die Tiefe der Betonstruktur

Für diese Versuche wurde ein Betonprobekörper mit gemischten Zuschlagsstoffen verwendet und mit Temperaturmessstellen präpariert. Dazu wurde in den Stein von unten ein Loch gebohrt, um drei Thermoelemente so zu fixieren, dass die Enden einen definierten Abstand zur Oberfläche und zueinander haben. Die Bohrung wurde anschließend mit Gips verfüllt. Das oberste Thermoelement stieß dabei ans Ende der Bohrung bis 2 cm unter der Oberfläche. Eine präparierte Probe und der Querschnitt (schematisch) der Probe sind in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: links: präparierter Stein mit Thermoelementen, rechts: Schema Querschnitt

Nach Aushärten des Gipses wurden mehrere Abtragsversuche auf dem Stein durchgeführt und dabei eine Spur direkt über den Thermoelementen gefahren. Nach einer Abkühlphase des Steins auf ca. 30 °C wurde dieselbe Spur noch einmal mit dem Laser abgefahren. Die Temperatur-Zeit-Verläufe für die einzelnen Messstellen sind in der Abbildung 18 wiedergegen.

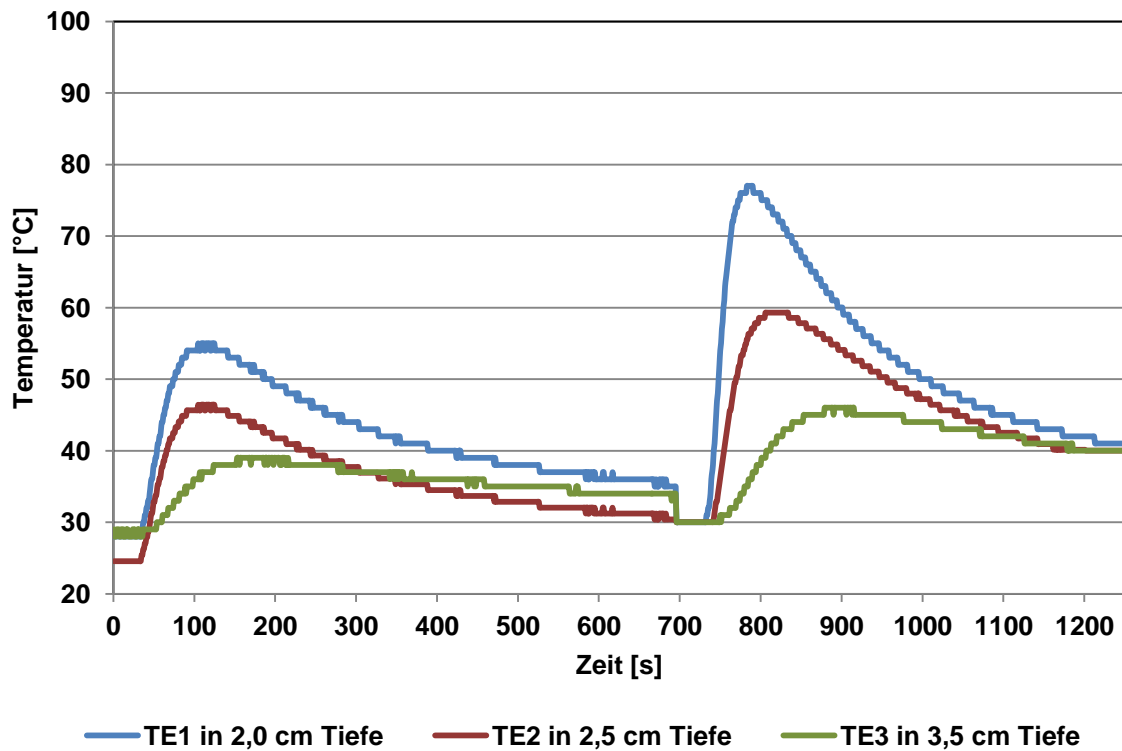


Abbildung 18: Temperatureintrag in tiefere Schichten

4.6.2. Wärmeleitung an der Oberfläche

Für die Haftfestigkeit der Saugplatten des Manipulators ist die Temperaturverteilung an der Oberfläche des bearbeiteten Betons in der Umgebung des Lasereintrags relevant. Der Hersteller garantiert eine Dichtigkeit der Saugplatten bis zu einer Temperatur von 70 °C. Deshalb wurden Versuche zur Bestimmung der Temperaturen an der Oberfläche und zur Wärmeausbreitung im Bereich der oberen Betonschichten durchgeführt. Für die Messung der Temperaturen wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Der Probestein wurde mit drei ca. zwei Millimeter tiefen Bohrungen für Thermoelemente versehen. Diese befanden sich in den ersten beiden Bearbeitungsschritten in unterschiedlichen Abständen senkrecht zur bearbeiteten Spur 1. Der Versuchsaufbau und die Positionen der Thermoelemente sind in Abbildung 19 dargestellt.

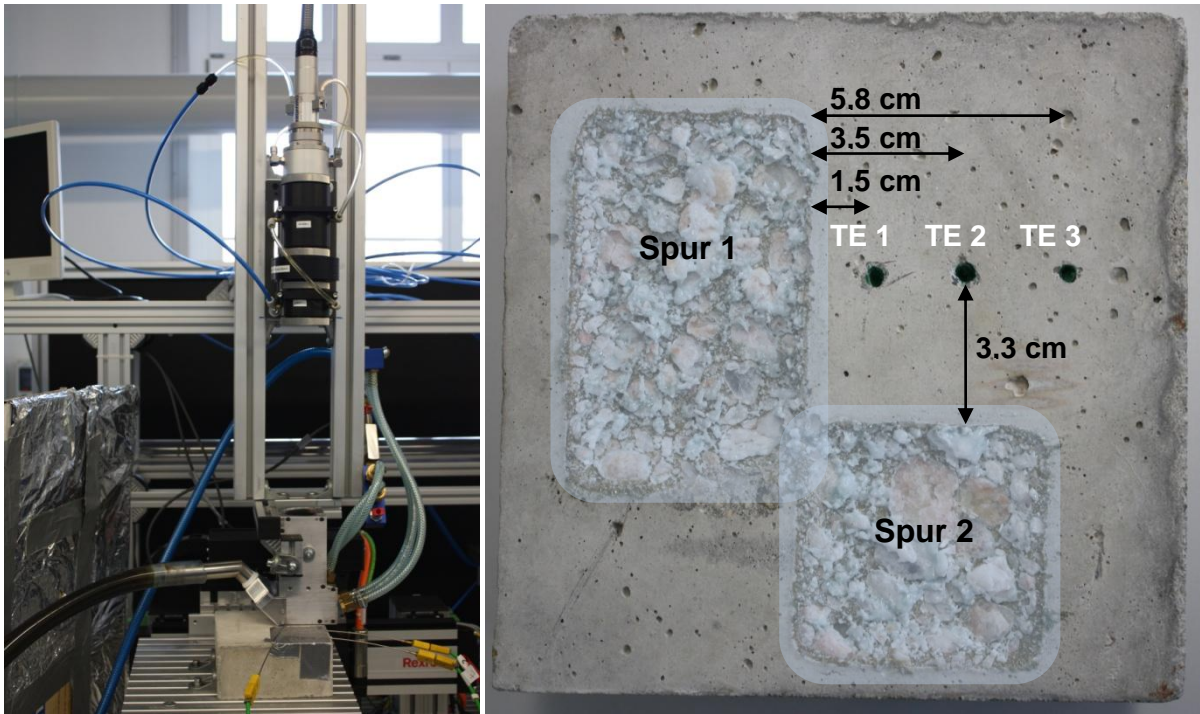


Abbildung 19: links: Versuchsaufbau Temperaturmessung; rechts: Messstellen und Bearbeitungsspuren auf Betonprobe

Die Spur 1 wurde mit einer Leistung von 10 kW und einem Vorschub von 400 mm/min bearbeitet. Die Spurlänge betrug 10 cm. Ein Messgerät zeichnete dabei die gemessenen Werte der Thermoelemente auf und rechnet diese parallel in Temperaturwerte um. Nach einer kurzen Pause wurde dieselbe Spur mit den gleichen Parametern noch einmal bearbeitet.

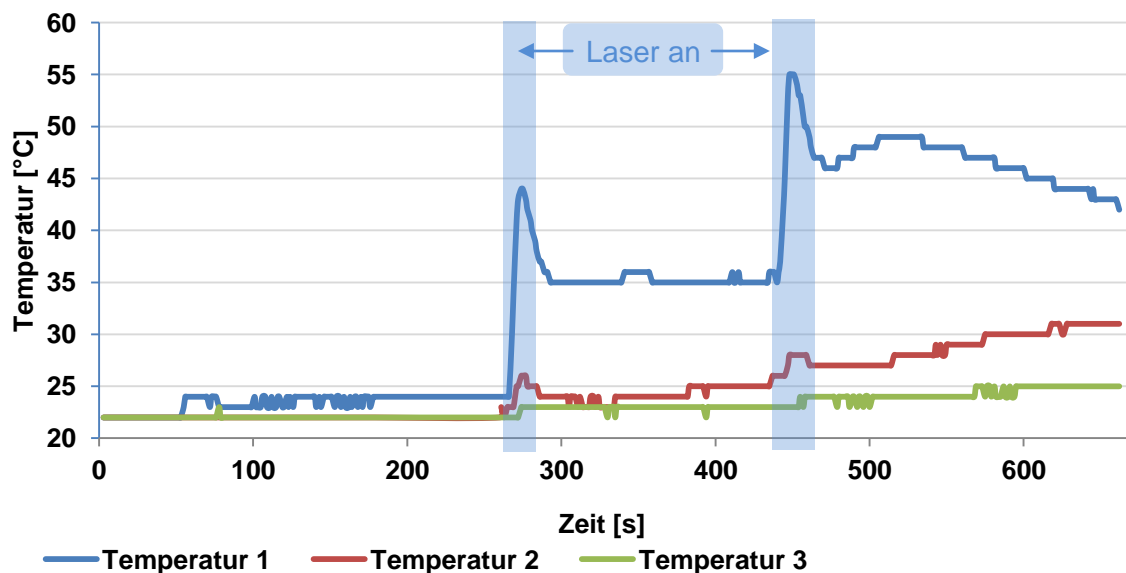


Abbildung 20: Temperaturverlauf im Oberflächenbereich während der Laserbearbeitung

Am ersten Messpunkt erhöhte sich in beiden Versuchen die Temperatur um ca. 20 K und fiel im Anschluss sehr schnell um ca. 10 K ab, um dann nochmals um wenige Kelvin anzusteigen und dann langsam abzufallen. An der zweiten Messstelle ließ sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf beobachten, allerdings waren die Temperaturmaxima hier deutlich niedriger. Der dritte Messpunkt befand sich ca. 6 cm von der bearbeiteten Spur entfernt. Das Thermoelement zeigte nur eine sehr geringe Erwärmung um einige Kelvin. Da die Saugplatten des Trägergerätes sich in einen Abstand von deutlich mehr als 10 cm zum Arbeitsbereich des Lasers befinden, ist an dieser Stelle mit keinen thermischen Einschränkungen zu rechnen.

Im Anschluss wurde parallel zu den Thermoelementen die Spur 2 bearbeitet. Dies erfolgte wiederum zweimal kurz hintereinander. Das Thermoelement 1 wurde hierbei für die Messung der Temperatur am Arbeitskopf direkt neben dem Laserspot an der Außenseite verwendet. Die gemessene Temperatur ist mit 140 °C im Maximum nach dem zweiten Arbeitsschritt höher als erwartet, klingt aber nach Ende der Bearbeitung schnell wieder ab.

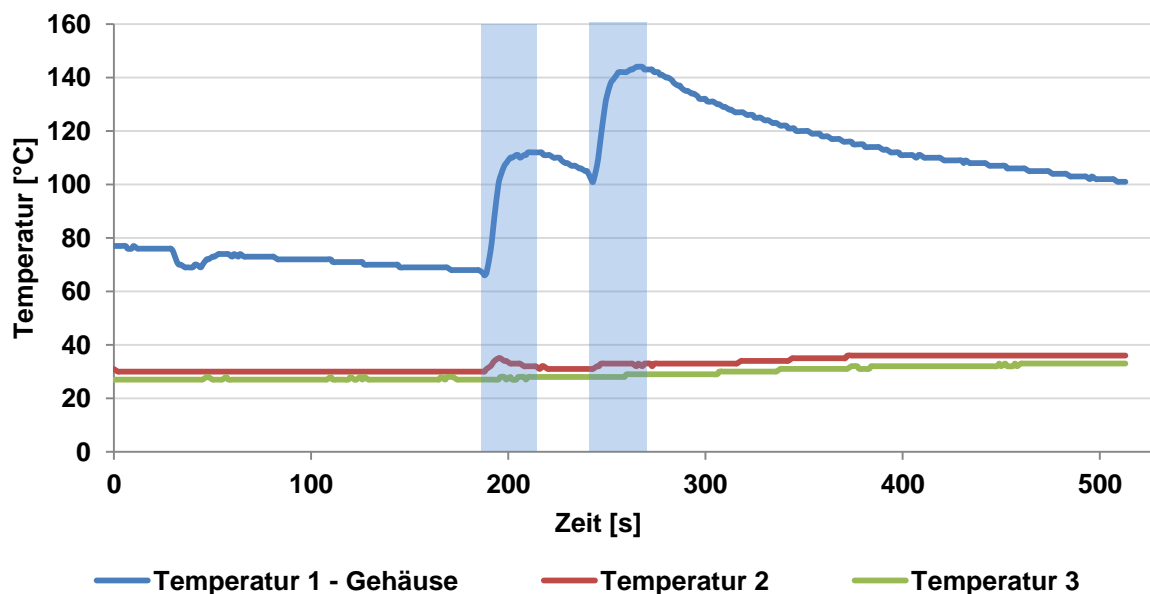


Abbildung 21: Temperaturverlauf auf Beton und am Gehäuse

Der Abstand der Spur zu beiden Messpunkten betrug 3,3 cm. Hier war eine Temperaturerhöhung um 4 - 5 K auf der Betonoberfläche zu beobachten.

Fazit:

Die maximal zulässige Temperatur an den Silicon-Dichtringen der Saugplatten des Geräteträgersystems wird vom Hersteller mit 70 °C angegeben. Die Saugplatten befinden sich in einem Mindestabstand von der Lasereinwirkungszone von > 100 mm.

Die Versuche zeigen, dass unter realen Einsatzbedingungen eine Beeinträchtigung der Saugplatten des Manipulators auch bei großer Inhomogenität in der Betonmatrix ausgeschlossen werden kann.

4.7. Abtragsmuster

Mit dem Ziel, ein geeignetes Bearbeitungsmuster für den Manipulator mit Laser-Arbeitskopf zu entwickeln, wurden Versuche mit verschiedenen Bearbeitungslagen durchgeführt. Hierbei erfolgte die Bewegung des Arbeitskopfes von links nach rechts parallel zum Boden (Pfeil 1) und einmal vertikal von oben nach unten sowie in entgegengesetzter Richtung (Pfeile 2 und 3).

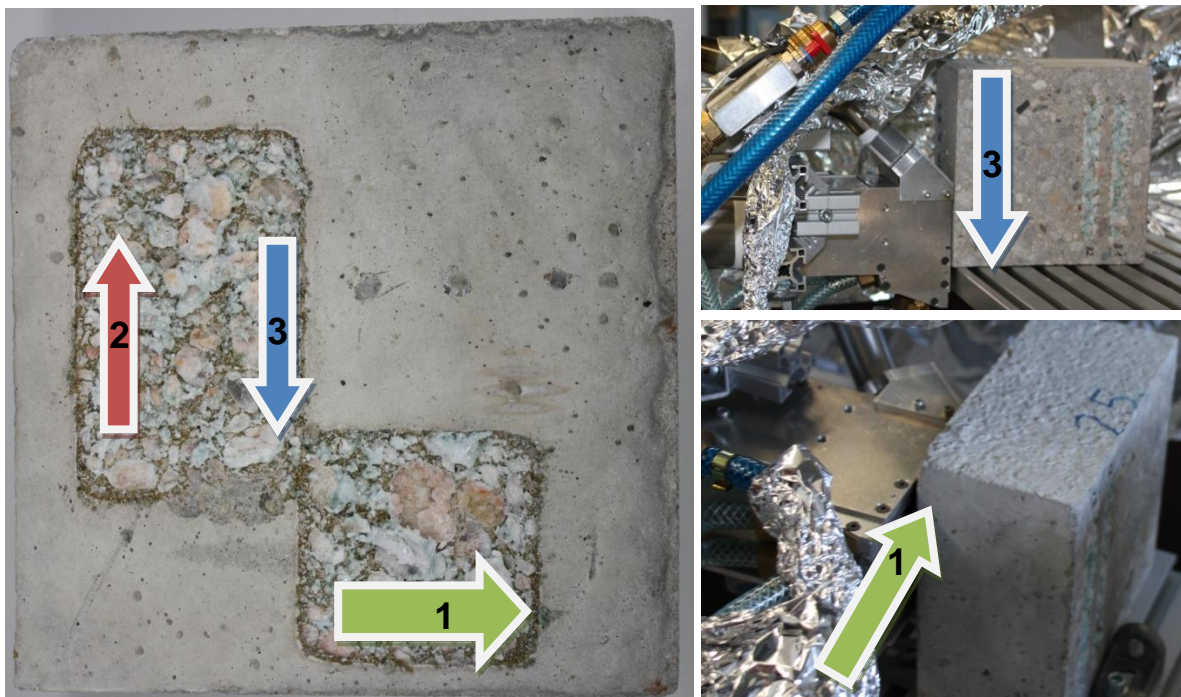


Abbildung 22: links: Bewegungsrichtungen an einer Wand; rechts oben: Versuchsaufbau für vertikalen Abtrag; rechts unten: Aufbau für horizontalen Abtrag

Die Versuche zeigten, dass die Bewegungsrichtung keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität der bearbeiteten Oberfläche hat. Für die Versuche wurde ein Vorschub von 800 mm/min eingestellt. Damit war der spezifische Energieeintrag geringer als bei den vorangegangenen Versuchen und es wurde eine Abtragtiefe von ein bis zwei Millimetern erreicht.

Anschließend wurden Versuche über Kopf durchgeführt, um aufzuzeigen, dass auch eine Bearbeitung von Deckenoberflächen möglich ist. Hierfür wurde die Optik mit senkrecht nach oben gerichtetem Laserstrahl auf dem Arbeitstisch montiert (Abbildung 23). Darüber befand sich, ebenfalls fest montiert, der Laserarbeitskopf. Der Probenstein wurde mittels einer Halterung am Koordinatentisch befestigt und über dem Laserstrahl und Laserarbeitskopf

verfahren. Es sind drei Versuche durchgeführt worden. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Parameter für Überkopfversuche

Versuch Nr.	Vorschub	Leistung
1	400 mm / min	5 kW
2	800 mm / min	10 kW
3	400 mm / min	5 kW

Die Abtragsflächen der Versuche 2 und 3 sind in Abbildung 23 abgebildet. In allen drei Versuchen ließen sich die Oberflächen abtragen und es verblieb, vergleichbar mit den Versuchen an Wänden oder Böden, nur eine geringe Menge von Restschmelze an der Oberfläche. Auch hinsichtlich der Absaugung gab es keine Einschränkungen. Somit ist auch eine Bearbeitung von Deckenoberflächen mit dem Laserabtragverfahren möglich.

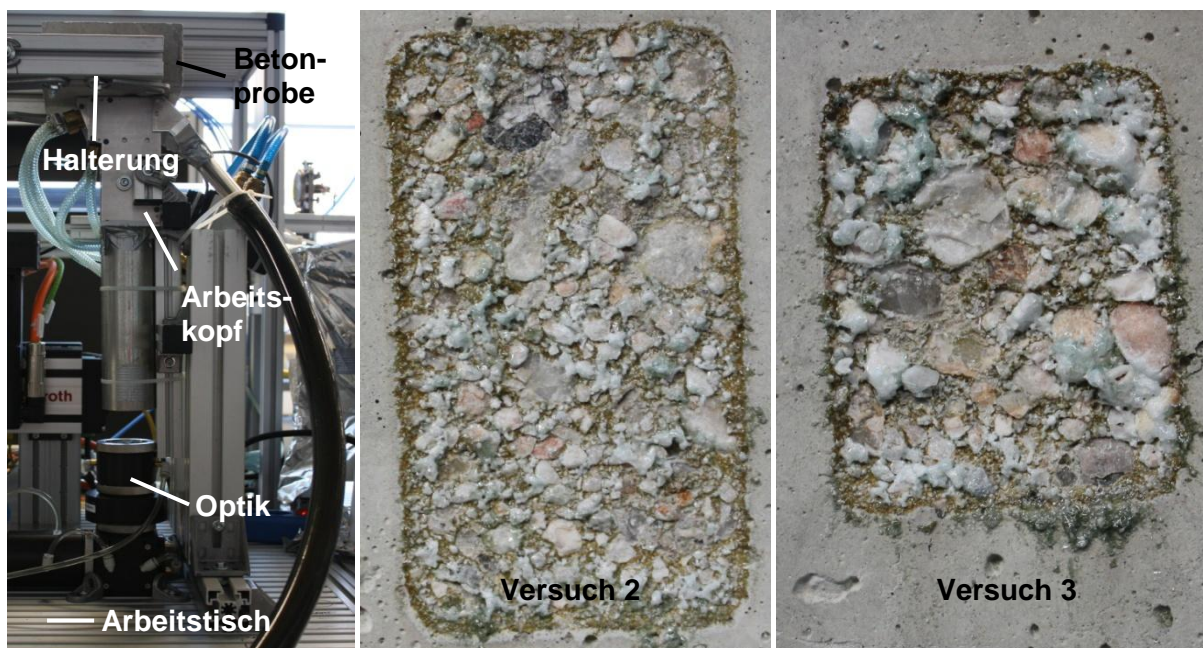


Abbildung 23: links: Versuchsaufbau „Überkopfarbeiten“; mittig und rechts: bearbeitete Oberflächen

4.8. Sensorik und Steuerung

Das Ziel des Projekts MANOLA ist die Entwicklung eines weitestgehend autark arbeitenden Dekontaminationssystems. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine umfangreiche Sensorik erforderlich. Sowohl die Sensorik als auch die Steuerung wurden vor den Praxistests separat auf ihre Funktionsfähigkeit getestet.

4.8.1. Aufgaben des Sensorsystems

Hauptaufgabe des Sensorsystems ist die Gewährleistung eines effizienten und störungsfreien Abtrags der zu dekontaminierenden Oberfläche. Daher ist es nötig, mögliche Störquellen zu erkennen, diese Informationen zu verarbeiten und entsprechende Reaktionen des Manipulatorsystems auszulösen. Hierfür wurden mögliche Störquellen identifiziert und ein diesbezügliches Erkennungssystem entwickelt. Die komplette Sensorik wird mit einer Schraubkonstruktion gehalten und ist dem Arbeitskopf vorgeschaltet. Sie tastet den Bereich senkrecht zur Wand, wie auch die Wandoberfläche vor dem Bearbeitungsschritt ab. Der Aufbau des Sensorsystems ist in Abbildung 24 dargestellt. Die verwendeten Sensoren und deren grundlegende Eigenschaften und Aufgaben werden im Folgenden erläutert.

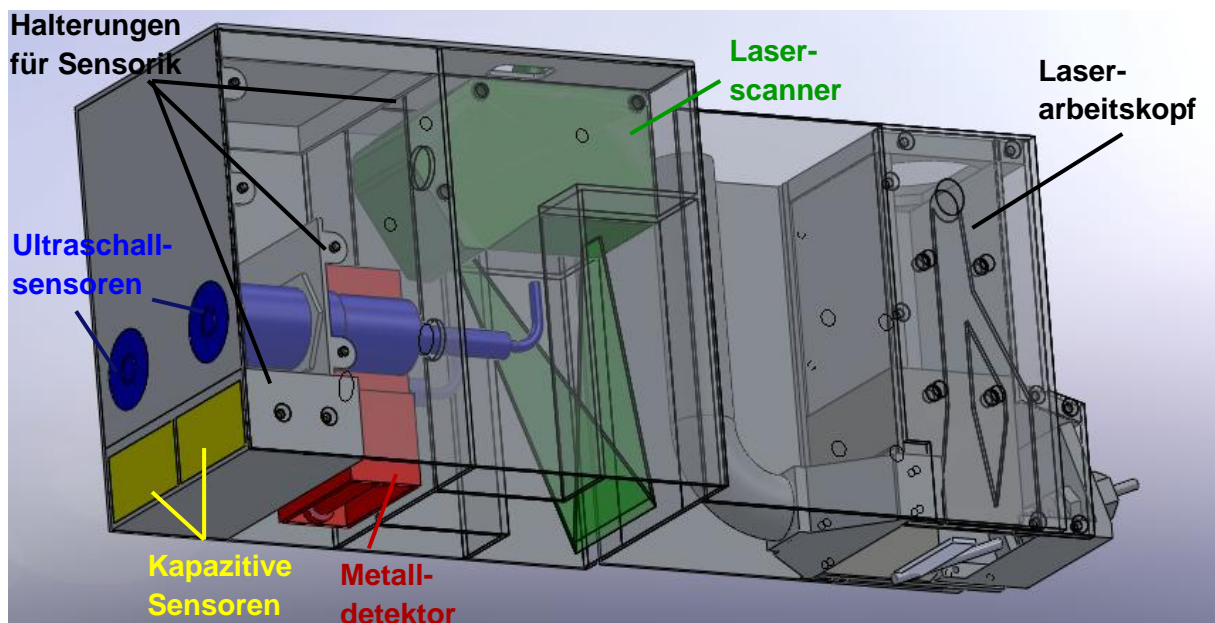


Abbildung 24: vorangeschaltete Sensorik und Lasearbeitskopf

Es kamen dafür vier unterschiedliche Sensorsysteme zum Einsatz:

- Ultraschallsensoren
- Kapazitive Sensoren
- Metalldetektor
- Laser-Scanner.

Die zwei Ultraschallsensoren (in Abbildung 24 blau dargestellt) überwachen den Bereich vor dem Laserarbeitskopf parallel zur Wand. Die Sensoren senden Ultraschallwellen aus, welche von physischen Hindernissen reflektiert und vom Sensor wieder erfasst werden. Mittels der Zeitdifferenz zwischen Aussenden und Erfassen der reflektierten Wellen lässt sich die Entfernung des Hindernisses bestimmen. Die verwendeten Sensoren des Typs mic+35/IU/TC der Fa. Microsonic besitzen einen Blindbereich von 65 mm und eine Reichweite von 350 mm (vgl. Abbildung 25). Ein dritter kleinerer Ultraschallsensor (mic+25) wird für das Einstellen des optimalen Abstandes des Arbeitskopfes zur Bearbeitungsfläche eingesetzt. Dieser befindet sich unterhalb des Laser-Scanners und misst den aktuellen Abstand zur Wandoberfläche. Die genaue Funktion ist Abschnitt 4.8.2 dargestellt.

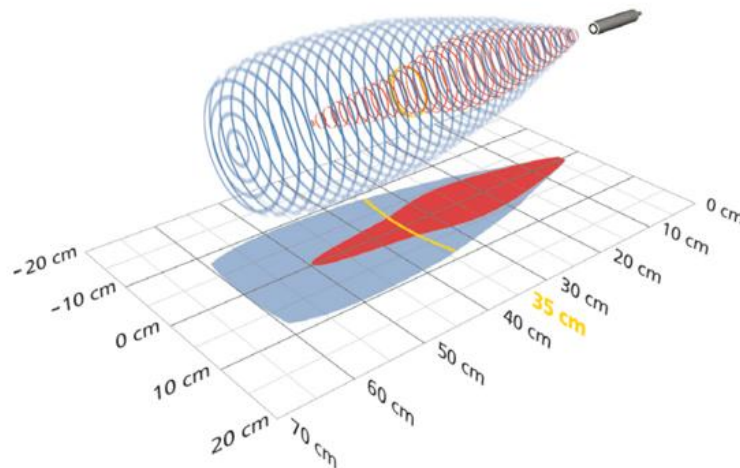


Abbildung 25: Messbereich der verwendeten Ultraschallsensoren (Quelle: www.microsonic.de)

Die gemessene Entfernung kann mit einem analogen Spannungs- oder Stromsignal abgegriffen werden. Befindet sich das Hindernis innerhalb des Blindbereiches wird ein Warnsignal an die Manipulatorsteuerung ausgegeben. Die Sensoren wurden in einer Höhe von 55 mm über dem Boden angebracht, um Fehlmessungen durch von der Wandoberfläche gestreute Strahlung zu vermeiden. Durch die kegelförmige Ausbreitung des Ultraschalls kann eine

raue Wandoberfläche zu Reflektionen führen, die dann vom System falsch interpretiert würde.

Zur Erfassung von kleineren Störstellen und zur Überwachung des Ultraschall-Blindbereiches sind unter den Ultraschallsensoren zwei kapazitive Sensoren installiert (in Abbildung 24 gelb dargestellt). Diese besitzen eine aktive Fläche, an denen ein elektrisches Feld anliegt. Gelangt in dieses Feld ein physischer Gegenstand, führt dieser zu einer Änderung der Feldstärke. Die Änderung wird vom Sensor erfasst und als digitales Signal ausgegeben. Der Sensor gibt dabei keine Informationen über Größe, Art und genaue Entfernung der Störgröße aus. Die Reichweite des Sensors ist relativ gering (maximal 2 cm) und hängt von der Größe und Beschaffenheit (Material, Geometrie) der Störquelle ab. Dieser Sensor ist somit die letzte Sicherheitsbarriere zum Schutz des Arbeitskopfes vor Beschädigungen durch Kollision.

Wie in Abschnitt 4.4 gezeigt, können größere metallische Einschlüsse auf bzw. direkt unter der Oberfläche den Laserdekontaminationsprozess negativ beeinflussen. Ein Metalldetektor (in Abbildung 24 rot dargestellt) erkennt solche Objekte und gibt ein entsprechendes Signal an die Gerätesteuerung. Ob das Objekt erkannt wird, hängt von der Größe und dem Abstand des Objektes ab. Der Metalldetektor besteht aus zwei Spulen. Wird das elektrische Feld um die erste Spule durch einen metallischen Gegenstand verändert, kommt es zur Induktion einer Spannung in Spule zwei. Mittels dieser messbaren Spannung wird der Metallkörper erkannt.

Für das Vermessen der Oberfläche wird ein Laserscanner des Typs M2DW 160/40 der Fa. MEL Mikroelektronik GmbH verwendet. Die zu bearbeitende Oberfläche wird dabei mit einem Laserstrahl lückenfrei gescannt. Das angezeigte Tiefenprofil ermöglicht, eventuelle Wanddurchbrüche oder Kanten zu identifizieren und den Laserprozess an dieser Stelle erforderlichenfalls abubrechen. Dies ist aus Sicherheitsgründen geboten, da das unbeabsichtigte Einstrahlen von Laserstrahlung in Nebenräume unbedingt vermieden werden muss.

Die Breite des Messbereiches ist abhängig von der Entfernung zwischen Scanner und der zu messenden Oberfläche. Die Einbauhöhe im Laserarbeitskopf beträgt 110 mm über der Oberfläche, dies ergibt eine mögliche Abdeckung der Oberfläche von 75 mm. Da die Breite des Laserspots unter 50 mm beträgt, kann mit diesem Scanner der komplette relevante Bereich abgescannt werden.

Die Einbindung der einzelnen Sensoren in die Steuerung des Arbeitskopfes wird im folgenden Unterkapitel näher erläutert.

4.8.2. Steuerung des Arbeitskopfes und programmtechnische Umsetzung

Die Steuerung des kompletten Dekontaminationssystems MANOLA erfolgt, in Abstimmung mit den Projektpartnern, mit Hilfe der Software LabVIEW von National Instruments. LabVIEW ist eine anwenderfreundliche Software, welche bei der Erfassung von Messwerten und der Steuerung von Anlagen in der Industrie weltweit genutzt wird. Für die Messwernerfassung und -ansteuerung werden sogenannte Compact Rio Real Time Controller verwendet, auf denen die LabVIEW-Programme, VIs genannt, installiert und betrieben werden können. (siehe Abbildung 26).

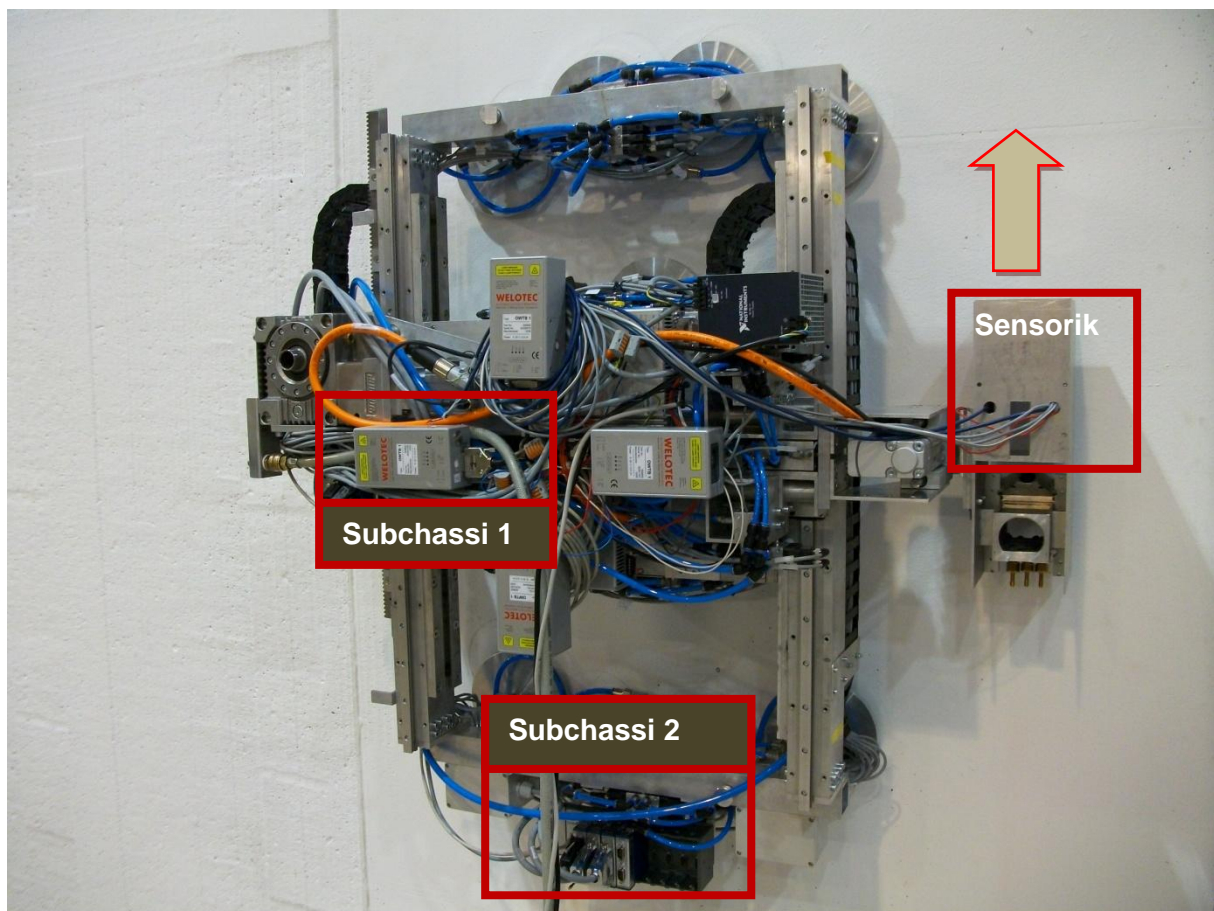


Abbildung 26: Manipulator angesetzt an Wand, Position der Sensorik und der Subchassis

Das Hauptchassis befindet sich auf dem Transportwagen für den Manipulator. Mit diesem kommuniziert der Bediener von MANOLA. Auf dem Manipulator befinden sich zwei Subchassis zur Steuerung der einzelnen Aktoren und Abfrage der Sensoren. Diese sind alle miteinander verbunden und kommunizieren untereinander über VIs. Für die Steuerung des Laserarbeitskopfes ist lediglich das Subchassis 1 des Manipulators auf der Traverse relevant. Von diesem werden alle Sensoren abgefragt und die Signale für den Laser, die Absaugdüsen und die Absaugung ausgegeben. Die Kommunikation mit den Stelleinheiten des Manipulators in Abhängigkeit der Messsignale erfolgt intern auf programmtechnischem We-

ge. Die Steuerung des Laserarbeitskopfes wird im Folgenden beschrieben, für Erläuterungen zur Steuerung des Manipulators wird auf den Bericht des Projektpartners verwiesen.

Programmteil Laserarbeitskopf

Das Programm für die Laserbearbeitung der Oberfläche läuft im Hintergrund und wird durch das Fahren der Traverse an den Endschalter 1 aktiviert. Es ist als Unterprogramm (SubVI) in das Steuerprogramm des Manipulators eingebunden. Der schematische Ablauf des Programms Laserbearbeitung ist in Abbildung 27 dargestellt.

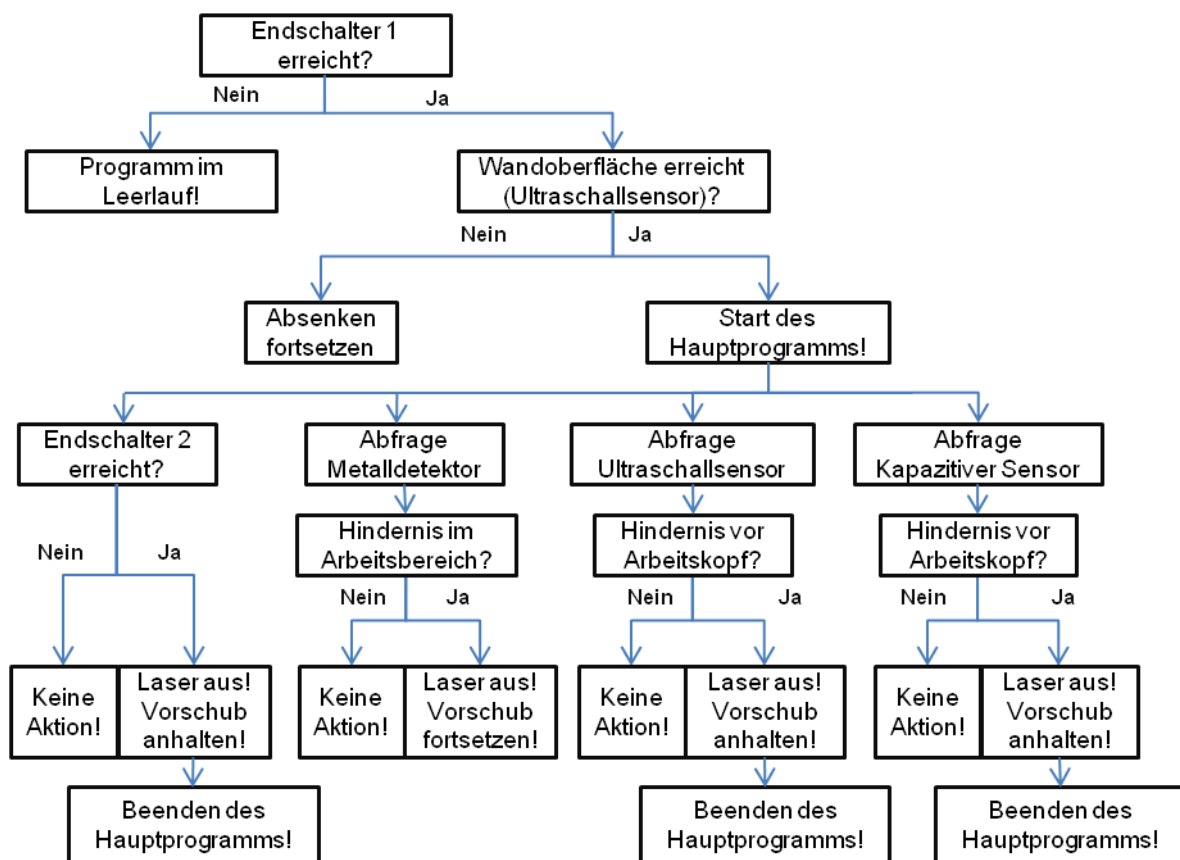


Abbildung 27: Ablaufplan des Programms für den MANOLA Laserdekontaminationsprozess

Nach Erreichen der Endstellung überprüft das Programm den Wert des dritten Ultraschallsensors (mic+25), der den Abstand zum Boden misst. Bei Erreichen des Schwellwertes (Sensorik ca. 10 mm über dem Boden), wird ein Signal an den Stellmotor des Manipulators übermittelt und das Absenken beendet. Im Anschluss startet das Hauptprogramm. In diesem werden alle 250 ms die Signale der Unterprogramme des Metalldetektors, der Ultraschallsensoren und der Kapazitiven Sensoren abgefragt. Hinzu kommt die Abfrage, ob der Endschalter 2 erreicht ist. In diesem Fall und wenn ein Hindernis vor dem Arbeitskopf durch die kapazitiven Sensoren oder die Ultraschallsensoren gemeldet wird, wird der Laser ausge-

schaltet, der Vorschub gestoppt und der gesamte Arbeitskopf nach oben gefahren. Meldet der Metalldetektor einen metallischen Einschluss in der Wand oder einen metallischen Gegenstand auf der Oberfläche, so wird der Arbeitskopf nicht angehalten. Der Laser hingegen wird ausgeschaltet. Nach dem Überfahren des kritischen Bereichs wird der Laser wieder eingeschaltet. In diesem Fall wird lediglich der Abtragprozess unterbrochen und hinter dem metallischen Objekt wieder fortgesetzt.

Die Unterprogramme für die Sensorik werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die kapazitiven Sensoren messen den Bereich unmittelbar vor dem Arbeitskopf. Durch die kurzen Messbereich von wenigen Millimetern, die Reichweite ist abhängig von der Größe des Hindernisses, wird in Folge eines positiven Signals der Laser sofort ausgeschaltet und der Vorschub angehalten (siehe Abbildung 28).

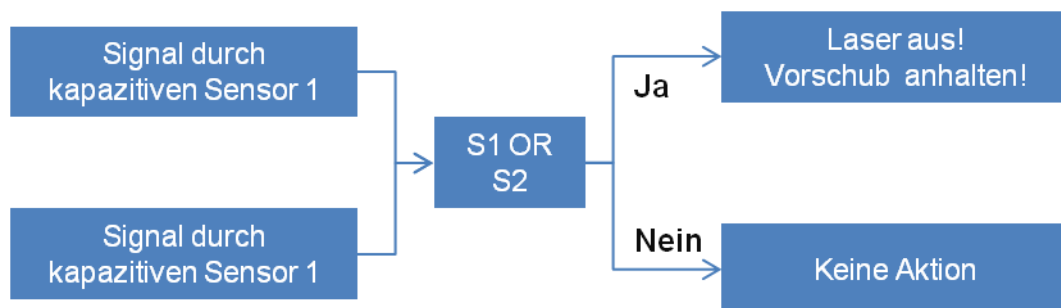


Abbildung 28: Programmablauf kapazitiver Sensor

Die Ultraschallsensoren messen die Entfernung bis zu einem Hindernis. Wird ein solches erkannt, erfolgt mit Hilfe der aktuellen Stellung der Traverse die Ermittlung der Position des Hindernisses. Dieser Wert wird gespeichert und bei Erreichen dieser Position wird analog dem Signal des kapazitiven Sensors vorgegangen. Der Laser wird ausgeschaltet, der Vorschub angehalten und als letzter Schritt der Arbeitskopf hochgefahren. Der Programmablauf ist schematisch in Abbildung 29 dargestellt.

Das SubVI Metalldetektor besteht aus zwei hintereinander ablaufenden Schritten. In Schritt 1 wird überprüft, ob sich an der aktuellen Position des Arbeitsbereiches ein metallisches Objekt befindet. Wurde an dieser Stelle etwas detektiert, wird mittels der Motorstellung die Position bestimmt und gespeichert (Schritt 2).

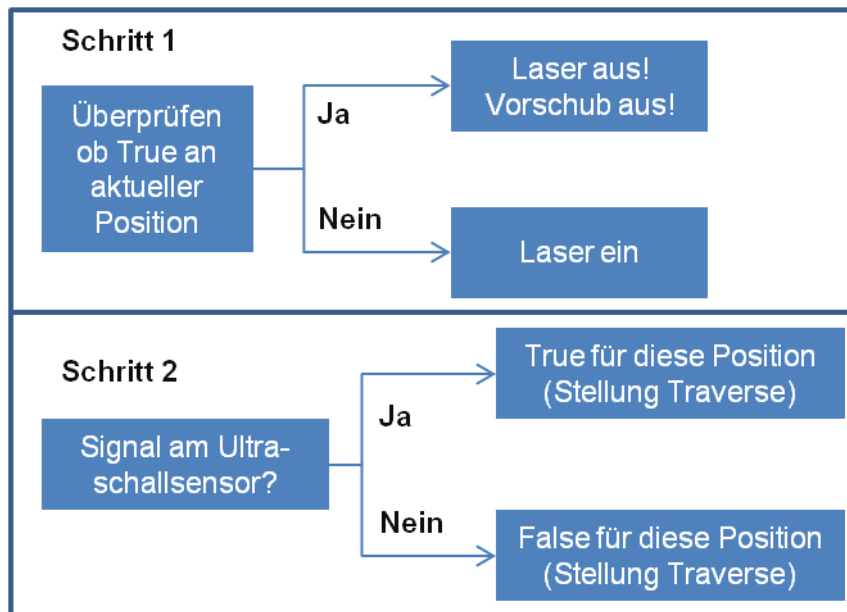


Abbildung 29: schematische Darstellung des SubVIs Ultraschallsensor

Erreicht der Laserarbeitskopf diesen Bereich, wird der Laser ausgeschaltet. Die ermittelte Position ist noch mit einem Sicherheitszuschlag von ca. einem Zentimeter in beide Richtungen versehen. Nach Überfahren des ermittelten Bereiches sowie des Sicherheitsbereiches wird der Laser wieder eingeschaltet und der Abtragprozess fortgesetzt. Die Absaugung bleibt während des gesamten Vorganges aktiv. Der schematische Ablauf des SubVIs Metalldetektor ist in Abbildung 30 dargestellt

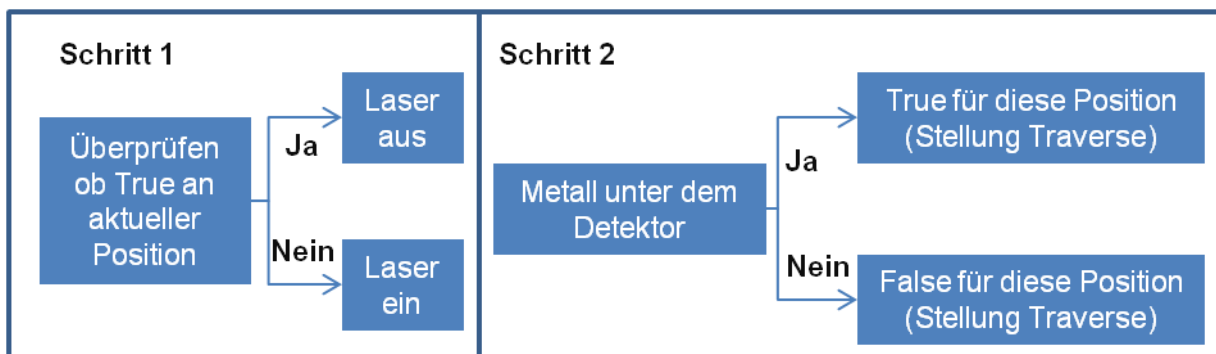


Abbildung 30: Schema des SubVIs Metalldetektor

Nach Ende des Teilprogrammes Laserabtrag fährt der Laserarbeitskopf wieder hoch und das Programm befindet sich im Leerlauf. Wird, nach einem Versetzen des Manipulators bzw. des Arbeitskopfes auf die nächste Spur, die Traverse wieder in die Startstellung gefahren, startet das Programm von vorn.

5. Test unter praxisnahen Bedingungen

Ein Ziel des Projektes ist die Zusammenführung der Laserdekontaminationstechnologie mit der Manipulatortechnik zu einem universell einsetzbaren, flexiblen Dekontaminationssystem.

5.1. Versuchsaufbau für Demonstrationsversuche

An der TU Dresden wurde ein lasertechnisch abgeschirmtes Versuchsfeld mit einer senkrecht stehenden Versuchswand aufgebaut. Es ist so ausgelegt, dass es die Arbeitsbedingungen, auf die ein Laserdekontaminationsgerät in einem realen KKW-Containment treffen würde, nachbildet. Die simulierte Einsatzsituation entspricht folgender Grundidee:

- Der Laser sowie dessen Steuer- und Hilfseinrichtungen befinden sich auf einem mobilen Trägersystem (Kleintransporter).
- Die Laserenergie wird über ein Glasfaserkabel (Faseroptik) an den am Manipulator befestigten Laserarbeitskopf geleitet. Der Abstand zwischen Laser und Arbeitskopf kann dabei mehrere hundert Meter betragen.
- Der Manipulator befindet sich vor dem Einsatz auf einer Transportlafette (Kettenfahrzeug). Die Transportlafette wird ferngesteuert an den Einsatzort gefahren. Dort wird der Manipulator an die Wand gesetzt und ist dann einsatzbereit.
- Der Dekontaminationsprozess wird ebenfalls ferngesteuert durchgeführt. Die abgesaugten Abprodukte gelangen über einen Unterdruckschlauch in einen Sammelbehälter. Die so vorgereinigte Absaugluft wird über ein HEPA-Filtersystem abgeleitet.

Für die Demonstrations-Experimente wurde die Laserenergie des 10 kW Diodenlasers über ein Lichtleitkabel (Faseroptik, Länge ca. 15 m, Durchmesser ca. 0,8 cm) an die Bearbeitungszone geleitet.

Die Vorderseite der Versuchswand wurde mit Metallblechen versehen, auf denen der Manipulator verfahren werden kann. Die Oberfläche der Bleche wurde matt beschichtet, um mögliche Reflektionen während der Versuche durch Streuungen des Lasers zu minimieren. Dadurch sollte eine eventuelle Schädigung der zur Aufzeichnung eingesetzten Kameras vermieden werden.

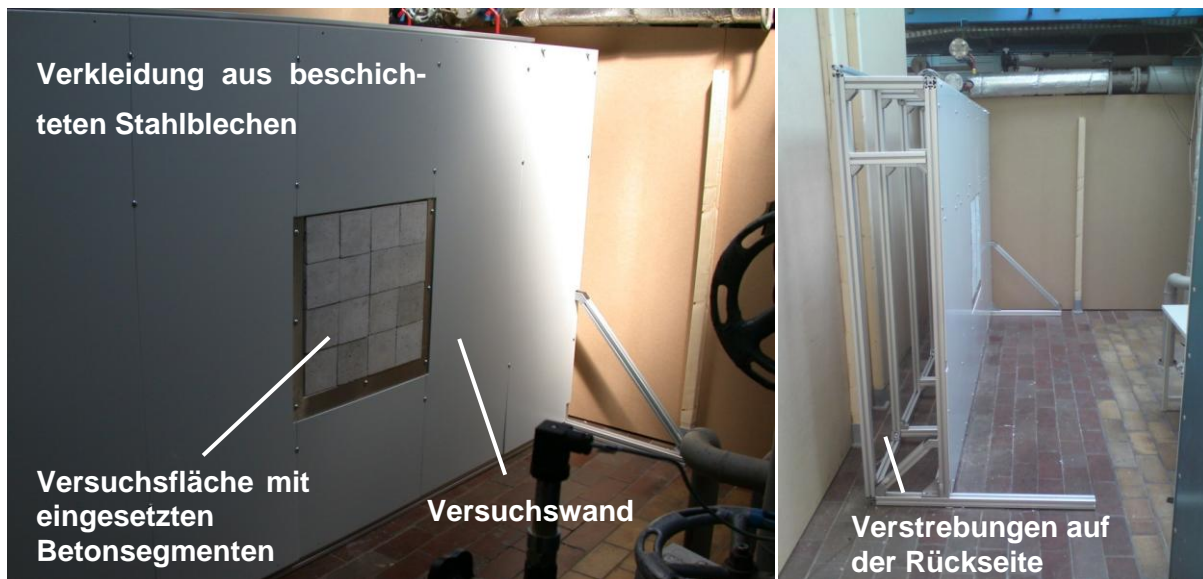


Abbildung 31: aufgestellte Versuchswand innerhalb des Sichtschutzes; rechts: Seitenansicht

Aus Sicherheitsgründen, bedingt durch den Einsatz eines Hochleistungs-Lasers musste um den kompletten Versuchsaufbau ein Sichtschutz installiert werden. Hierfür wurden 2,8 m hohe Schutzwände aufgestellt. Nach oben war der Versuchsbereich offen, um die Zugänglichkeit für den Portalkran zu gewährleisten.

Das Faserkabel des Diodenlasers, die Druckluftversorgung sowie die Signalleitungen für die Steuerung des Lasers werden durch einen Wanddurchbruch aus dem Laserlabor zur Versuchsfläche geführt.

Für die Begleitung der Experimente und den Nachweis der erfolgreichen Durchführung wurden alle Versuche mit Videokameras aufgezeichnet (vgl. Abbildung 31).



Abbildung 32: Videoaufnahme während der Versuche mit an der Versuchswand angesaugtem Manipulator

Aus Sicherheitsgründen wurde der Manipulator zusätzlich über einem Kran gesichert. Dieser hätte im Fall einer Havarie das Trägersystem mit dem Laserarbeitskopf vor einem Absturz bewahrt (siehe Abbildung 33).

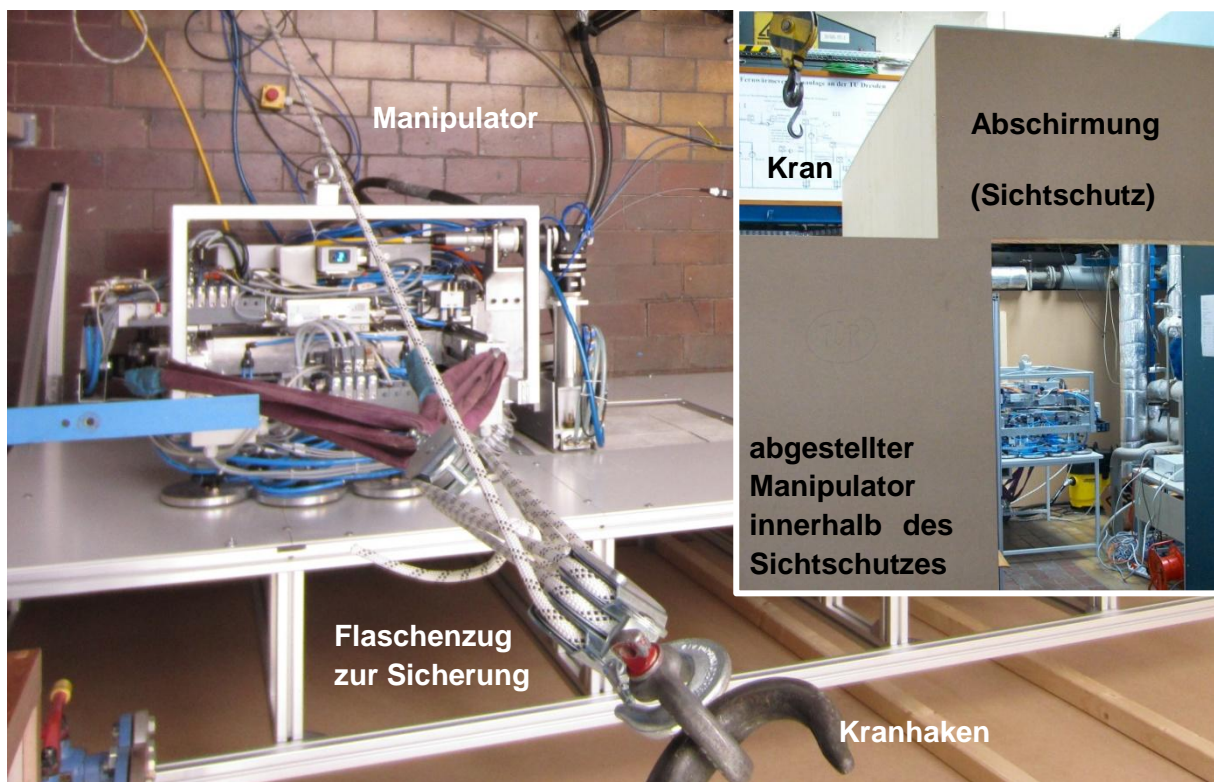


Abbildung 33: mit Kran gesicherter Manipulator (Blick von oben auf den Manipulator); kleines Bild rechtsoben: experimentelle Anordnung in der Versuchshalle

In Abbildung 34 ist der an der Wand angesaugte Manipulator zu sehen. Über dem Arbeitskopf ist die Umformoptik mit der 90°-Umlenkeinheit für den Laserstrahl zu erkennen. Der Motor neben dem Arbeitskopf senkt den Arbeitskopf auf die Wandoberfläche ab. Nach dem Starten der Bearbeitung werden die ausgetragenen Partikel mittels des Absaugschlauches abgeführt. Die restlichen Medienleitungen, wie die Druckluft für die Saugplatten und für das Ausblasen der Schmelze, die Laserfaser sowie Signalleitungen zwischen Manipulator und Lasersteuerung, werden von unten an den Manipulator herangeführt, unter dem Drehpunkt befestigt und von dort weitergeführt.

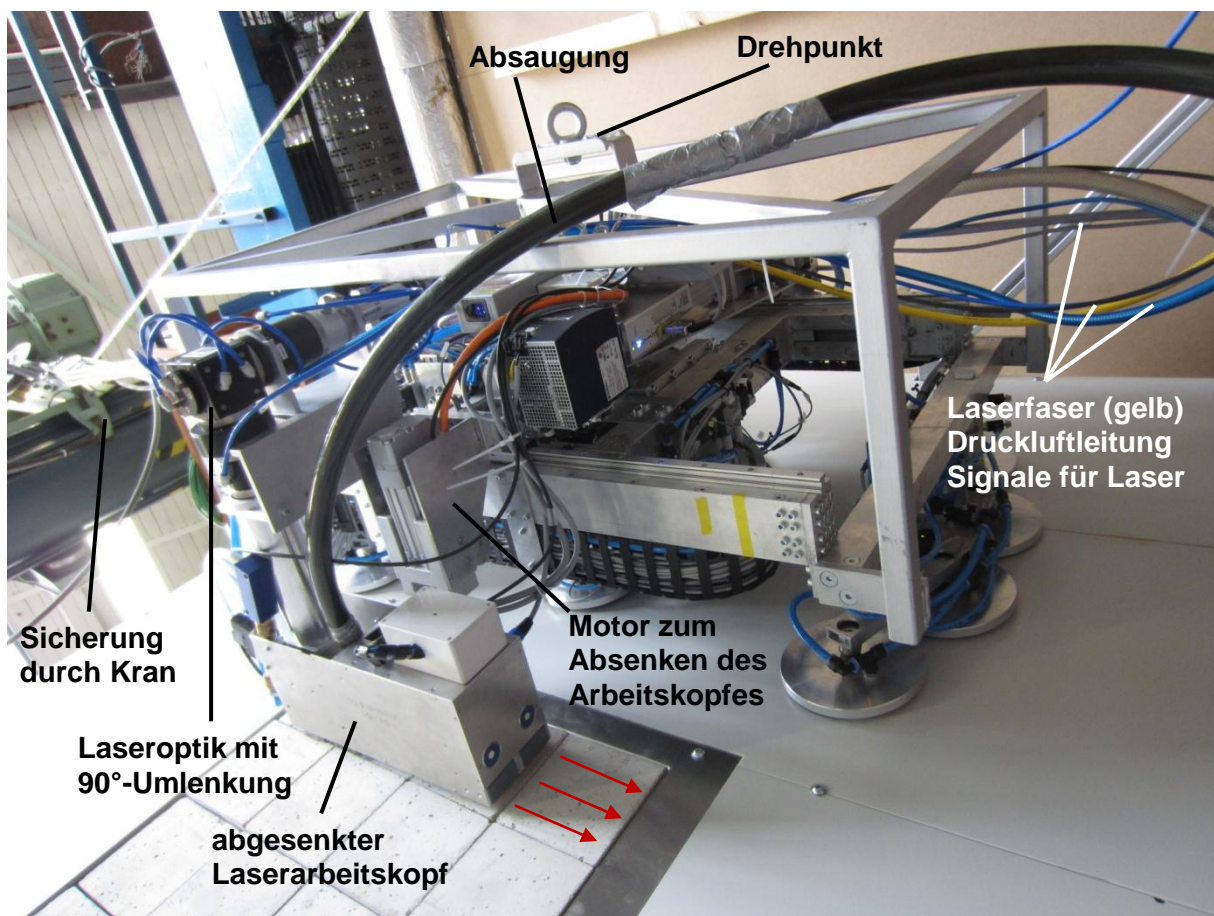


Abbildung 34: angesaugter Manipulator mit Medienleitungen

5.2. Durchführung der Demonstrationsversuche

Zu Beginn der Demonstrationsversuche wurden die wesentlichen Funktionen des Manipulators separat getestet. Dazu wurde zuerst das Schreiten des Manipulators durch Versetzen des Unterwagens zum Oberwagen mit angeschlossenem Laserarbeitskopf demonstriert. Dabei werden die Saugplatten des Unterwagens von der Wand gelöst und dieser mittels eines Stellmotors bis in die Endposition verfahren. In dieser Position saugt er sich wieder an

die Wand an. Anschließend werden die Saugplatten des Oberwagens mit Luft geflutet und dieser mittels des Motors verfahren.

Nach Erreichen der neuen Startposition kann der eigentliche Bearbeitungszyklus beginnen.

Im ersten Schritt wurde der Ablauf der Bearbeitung ohne Aktivierung des Lasers gezeigt und mittels Videokamera aufgezeichnet. Dazu wird der Laserarbeitskopf abgesenkt. Mittels des Ultraschallsensors wird der Abstand zwischen Arbeitskopf und Oberfläche gemessen. Ist die optimale Position relativ zur Oberfläche erreicht, wird ein Signal an die Steuereinheit gesendet und der Stellmotor stoppt. Die Verriegelung zwischen Traverse und Unterwagen wird gelöst, so dass alle Saugplatten an der Wand angesaugt bleiben können, während der Arbeitskopf eine komplette Bearbeitungsbahn bis zum Ende des Oberwagens verfährt. Anschließend wird der Arbeitskopf wieder angehoben und zurück an die Startposition verfahren. Im nächsten Schritt wird der Arbeitskopf mit der Optik und der Sensorik um 45 mm (Spurbreite der Laserbearbeitung) nach außen versetzt und wieder abgesenkt. Wieder wird eine Bahn gefahren und wie vorher beschrieben fortgefahren. Mittels der Stellzylinder können drei parallele Bahnen bearbeitet werden, bevor der komplette Manipulator wieder versetzt werden muss.

Nach diesen erfolgreichen Tests wurde anschließend der komplette Laserabtragprozess vorgeführt. Wie in dem zuvor beschriebenen Versuch wird der Arbeitskopf in Startposition gefahren und dort abgesenkt. Vor Beginn des Abtrags scannen alle Sensoren den Arbeitsbereich auf Hindernisse in Arbeitsrichtung und auf mögliche metallische Objekte auf der Bearbeitungsfläche ab. Mit Start der Bearbeitung wird der Laser aktiviert und die Oberfläche abgetragen. Der Abtrag erfolgte im Beispiel mit den Parametern, die in den vorangegangenen Experimenten als optimal ermittelt wurden. Sie sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: verwendete Laser-Parameter für den Demonstrationsversuch

Vorschub	Laserleistung	Ausblasdruck	Pulsdauer	Pulspause
400 mm/min	10 kW	7 bar	5 ms	100 ms

Die Laserleistung und die Einstellungen für die Druckluft werden über die Steuerung des Diodenlasers gesteuert. Der Motor der Traverse regelte den Vorschub des Arbeitskopfes. Dieser kann im Bedarfsfall vom Bediener manuell verändert werden.

Für die erste Bearbeitungsspur wurde der Laserarbeitskopf auf der Metalloberfläche über der Betonfläche gestartet. Die Aktivierung des Lasers erfolgte erst nach dem Erreichen der Be-

tonoberfläche. Nach der erfolgreichen Bearbeitung versetzte der Manipulator den Arbeitskopf neben die erste Bearbeitungsspur um 45 mm.



Abbildung 35: zwei nacheinander bearbeitete Spuren auf der Betonoberfläche

In dieser Position kann der Vorgang noch ein weiteres Mal durchgeführt werden. Im Anschluss daran muss der Manipulator neu versetzt werden. Vor dem Versetzen wird die Traverse mit dem Arbeitskopf wieder in Mittelposition gefahren und mit dem Unterwagen verriegelt. Zwischen zwei Bearbeitungsschritten wird der Arbeitskopf hochgefahren, um ein Verkanten an der Wandoberfläche zu vermeiden (siehe Abbildung 35).



Abbildung 36: Blick von oben auf Arbeitskopf in Endposition und die bearbeitete Oberfläche

Diese Prozessschritte wurden während der Demonstrationsversuche an der TU Dresden mehrfach demonstriert und mittels Videokamera aufgezeichnet. Dieses Video steht als Informationsmaterial zur Verfügung. Der Ablauf der einzelnen Schritte wie sie auch in dem erstellten Video zu sehen sind, ist in Abbildung 37 dargestellt.

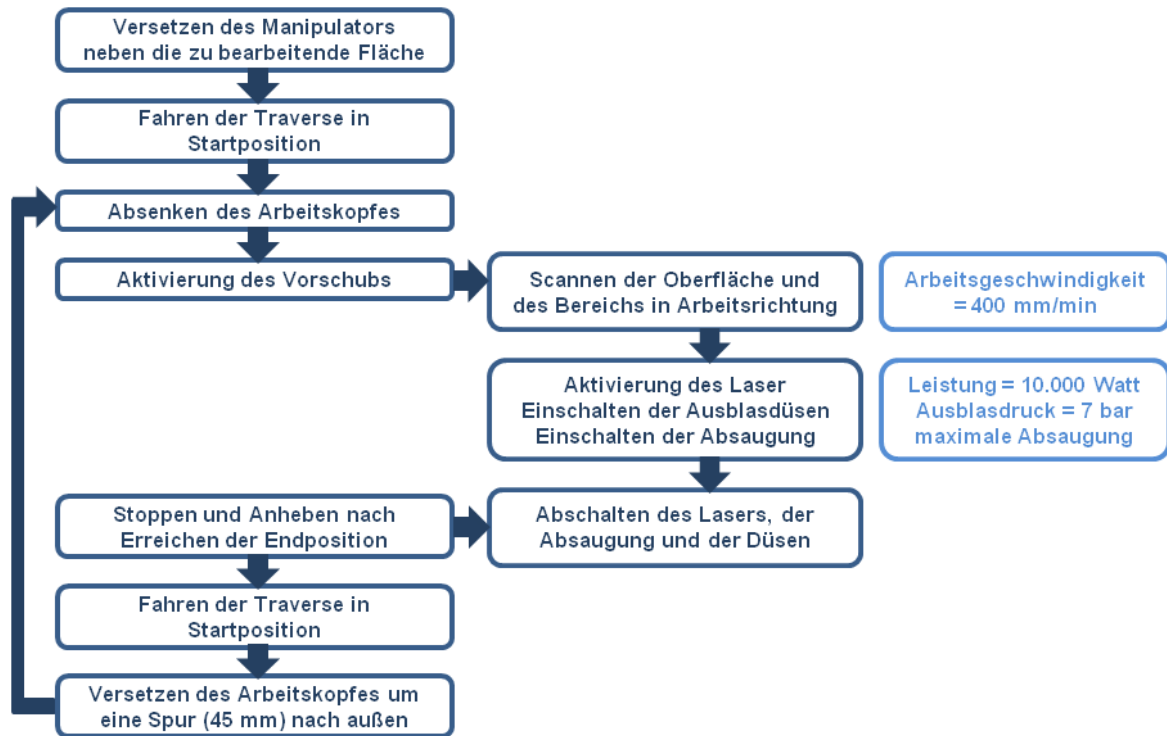


Abbildung 37: Ablaufplan für die Bearbeitung mit dem Manipulator

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von einer umfangreichen Literaturrecherche wird einleitend gezeigt, in welchem Umfang mit einem Anstieg der Rückbauarbeiten im Bereich kerntechnischer Anlagen in nächster Zukunft zu rechnen ist. Dieser resultiert grundsätzlich aus der begrenzten Laufzeit der Kernkraftwerke, wird aber hinsichtlich der zeitlichen Staffelung durch den politisch motivierten Beschluss der deutschen Bundesregierung zum beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie noch einmal forciert. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit zu prüfen, ob alternativ zu den bestehenden klassischen Rückbautechnologien innovative, hoch effiziente Techniken und Technologien verfügbar sind.

Das Ziel des Projektes MANOLA war die Entwicklung und Fertigung eines manipulatorgetragenen Laser-Dekontaminationsgerätes. Dazu wurden die Ergebnisse und Erfahrungen aus den beiden BMBF-geförderten Vorläuferprojekten LASABA (Entwicklung und Erprobung einer laserbasierten Dekontaminationstechnologie / Professur für Wasserstoff- und Kern-

energietechnik der TU Dresden) und AMANDA (Entwicklung und Erprobung eines autark operierenden Manipulators / Professur für Technologie und Management des Rückbaus kerntechnischer Anlagen am KIT) zusammengeführt.

In dem hier vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse für die Teilaufgabe „Lasertechnologie“ vorgestellt.

Als Arbeitslaser stand ein neuartiger Diodenlaser mit einer kontinuierlichen Strahlleistung von 10 kW zur Verfügung. Die Laserenergie wurde über eine Entfernung von 15 m mittels Lichtleitkabel vom Laser zum Arbeitskopf geführt. Grundsätzlich kann diese Entfernung auch über 100 m betragen. Dadurch können im praktischen Einsatz die Laserquelle und der am Manipulator befestigte Laserarbeitskopf räumlich getrennt operieren. D. h. der Laser würde sich außerhalb des Kontrollbereiches z.B. auf einem Kleintransporter befinden und lediglich der autark arbeitende Manipulator mit dem Laserarbeitskopf wäre im Kontrollbereich des KKW's unterwegs. Die Einsatzsteuerung könnte im Gebäude außerhalb des Kontrollbereiches stehen. Durch die Möglichkeit der räumlich getrennten Anordnung der einzelnen Komponenten kann eine konsequente Minimierung der radiologischen Personenlast und der Sekundärkontaminationen erreicht werden.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde ein neuer Laserarbeitskopf, optimiert für eine Laserleistung von 10 kW entwickelt und gebaut. Er besteht aus der Laseroptik, dem druckluftgetriebenen Ausblasseystem, der Partikelabsaugung, den Sensoren und der Steuer elektronik. Durch die eingesetzte Spezialoptik wird der Laserstrahl im Fokus zu einem Rechteck mit 10 x 45 mm² Bearbeitungsfläche umgeformt. Die damit erreichte maximale Abtragfläche pro Zeiteinheit betrug 1,2 m²/h bei einem Vorschub von 400 mm/min und einer Abtragtiefe von zwei bis drei Millimeter. Es konnte gezeigt werden, dass der Prozess unabhängig von der Bearbeitungsrichtung, sowohl vertikal als auch horizontal an einer Wand oder an Decken durchführbar ist.

Um den weitestgehend autark verlaufenden Abtragprozess zu sichern und optimal auszuführen wurden mehrere unterschiedlich agierende Sensorsysteme in den Bearbeitungskopf integriert. Sie messen und steuern den optimalen Abstand der Laseroptik zur Wandoberfläche, vermessen die Oberflächenstruktur der zu bearbeitenden Wand, warnen vor Kollisionshindernissen und vor metallischen Einschlüssen in der Wand. Alle elektronischen Komponenten des Laserarbeitskopfes kommunizieren bzw. interagieren mit der zentralen Steuerung des Manipulators, so dass die angestrebte autarke Arbeitsweise realisiert werden kann.

Gesondert durchgeführte Versuche lieferten Informationen über die sich einstellenden Temperaturfelder in der Umgebung der Bearbeitungszone. Sie zeigen, dass grundsätzlich nicht mit signifikanten Beeinflussungen der Baustatik der bearbeiteten Wände zu rechnen ist, da evtl. vorhandener Stahlbewehrungen im Beton nicht über die zulässigen Werte aufgeheizt werden. Eine Schädigung der pneumatischen Saugplatten des Trägersystems kann ebenfalls ausgeschlossen werden.

Versuche mit freigemessenen Originalbetonproben aus dem Kernkraftwerk Würgassen bestätigten die uneingeschränkte Anwendbarkeit der Laser-Dekontaminationstechnologie auf real eingesetzte Betone.

Die abschließenden Versuche zur Demonstration des Gesamtgerätes zeigten, dass der Laserarbeitskopf in Verbindung mit dem Manipulator als Trägergerät die gestellten Anforderungen an ein autark arbeitendes Dekontaminationssystem in vollem Umfang erfüllt.

Die Versuche wurden videot technisch dokumentiert und stehen für Informationszwecke zur Verfügung.

Die Weiterentwicklung der vorgestellten Technologie wird vor Allem in zwei Bereichen gesehen, der Erhöhung der Abtragfläche pro Zeiteinheit und der Adaption der Lasertechnologie auf die Dekontamination chemisch kontaminierter Oberflächen.

Kommerziell verfügbare Hochleistungslaser werden heute bereits mit Strahlleistungen von über 50 kW angeboten. Der Übergang von dem im Projekt verwendeten 10 kW Laser zu einem mit 50 kW Strahleistung würde eine Erhöhung der Abtragfläche pro Zeiteinheit auf 6 m²/h bewirken. Damit sind solche Dekontaminationssysteme in Verbindung mit den daraus resultierenden technologischen Vorteilen bereits heute konkurrenzfähig gegenüber herkömmlichen mechanischen Dekontaminationsverfahren. Ein Ende der rasanten Entwicklung der elektronischen Laser hin zu immer höheren Strahlleistungen ist nicht abzusehen.

Die Anwendung der hier vorgestellten Lasertechnologie auf die Entgiftung chemisch kontaminierter Oberflächen eröffnet ein weiteres, hoch attraktives Anwendungsfeld. Insbesondere im nuklearen Bereich wurden viele Oberflächen mit PCB-haltigen, krebserregenden Lack-schichten zur besseren Reinigung der Oberflächen versehen. Diese Schutzlacke müssen nach heutigen Vorschriften aufwendig abgetragen und über spezielle thermische Verfahren kostenintensiv entsorgt werden. Die für die radiologische Dekontamination entwickelte Lasertechnologie bietet hier eine innovative und kostengünstige Alternative.

Beide Entwicklungsziele sind Gegenstand weiterführender Arbeiten der Berichtersteller.

7. Literaturverzeichnis

Anthofer Anton Analyse der Datenbasis, resultierend aus der Reststoffbearbeitung, von Materialien aus den im Rückbau befindlichen Kernkraftwerken Würgassen und Stade // Interdisziplinäre Projektarbeit. - Dresden : [s.n.], 2010.

Blohm-Hiebe Ute Stilllegung und Rückbau in der Europäischen Union:Aktueller Status [Artikel] // atw. - Luxemburg : Infoforum Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH, 2009. - 02. - S. 80 - 83. - ISSN 1431-5254.

E.ON Kernkraft - Standorte - Würgassen [Online]. - http://www.eon-kernkraft.com/pages/ekk_de/Standorte/Wuergassen/index.htm.

EnBW - Standorte KKW - Obrigheim [Online]. - http://www.enbw.com/content/de/der_konzern/enbw_gesellschaften/enbw_kernkraft/standorte/obrigheim/index.jsp.

E.ON Kernkraft - Standorte - Stade [Online]. - http://www.eon-kernkraft.com/pages/ekk_de/Standorte/_documents/kernkraft-rueckbau_Stade_de.pdf.

EU-Kommission Bericht über die Verwendung der finanziellen Ressourcen für die Stilllegung von [Bericht]. - Brüssel : [s.n.], 2004. - .

EU-Kommission Zweiter Bericht über die Verwendung der finanziellen Ressourcen für die Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen und die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle [Bericht]. - Brüssel : [s.n.], 2007.

EWN Gruppe - Standort Greifswald - Historie [Online]. - <http://ewn-gmbh.de/ewngruppe/ewn/standort-greifswald/das-unternehmen/historie.html>.

Herrmann Marion [et al.] Dekontamination silikatischer Oberflächen in kerntechnischen Anlagen mittels Laserabtrag bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung II [Bericht]. - Dresden : TU Dresden, 2009.

Herrmann Marion [et al.] Dekontamination silikatischer Oberflächen mittels Laserabtrag bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung. - Dresden : Jahrestagung Kerntechnik, 2009.

Herrmann Marion, Lippmann Wolfgang und Hurtado Antonio The Release of Radionuclides in the Laser Decontamination Process // Icone 17th. - Brüssel : [s.n.], 2009.

Hurtado Antonio [et al.] Decontamination of radioactively contaminated concrete surfaces by means of a manipulator-borne laser system. - Dresden : Kontec 2009, 2009.

Knorr Jürgen [et al.] Dekontamination silikatischer Oberflächen in kerntechnischen Anlagen mittels Laserabtrag bei gleichzeitiger Abproduktkonditionierung. - Dresden : TU Dresden, 2006.

Littwin Rene [et al.] Innovative surface decontamination using a manipulator-deployed laser system. - Berlin : Jahrestagung Kerntechnik, 2010.

Littwin Rene, Lippmann Wolfgang und Hurtado Antonio Entwicklung eines innovativen laserbasiertes Verfahren zum umweltfreundlichen Abtrag von Schutzschichten. - Dresden : Kontec 2011, 2011.

Loeb Andreas RDB Rückbau im Kernkraftwerk Stade: Innovative Umsetzung [Artikel] // atw. - Alzenau : Infoforum Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH, 2011. - 03.

Müller Harald S. und Hörenbaum W. Abbruch massiver Betonbauwerke der Energietechnik [Bericht]. - Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie, 2009.

Preussen Elektra AG Stilllegung und Rückbau (Kurzinformation). - Hannover : [s.n.], 1996.

Schönit Markus Untersuchung von thermischen Rückbauverfahren auf ihre Anwendungsmöglichkeit beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen // Diplomarbeit. - Karlsruhe : TH Karlsruhe, 2005.

Thierfeldt S. und Schartmann F. Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen - Erfahrung und Perspektiven [Bericht]. - Aachen : Brenk Systemplanung, 2009.

Witthenauer S. Untersuchungen zu mechanischen und hydraulischen Rückbauverfahren auf ihre Anwendbarkeit beim Rückbau kerntechnischer Anlagen // Diplomarbeit. - Karlsruhe : TH Karlsruhe, 2005.