



OBERFLÄCHENENTSCHICHTUNG MITTELS LASERSTRAHLUNG

Untersuchungen zur Dekontamination radioaktiv und chemisch-toxisch belasteter Betonoberflächen mittels Laserstrahlung

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-ingenieur

Dr.-Ing.

angenommene

DISSERTATION

Herrn Dipl.-Ing. Anton Philipp Anthofer

geboren am 21.03.1986 in München

Tag der Einreichung: 22.09.2014

Tag der Verteidigung: 16.12.2014

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Antonio Hurtado

Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

GLIEDERUNG

1	Einleitung	5
1.1	Motivation	5
1.2	Zielstellung	6
1.3	Methodik und Aufbau	6
2	Ressourcenschonung und Rezyklierung	8
2.1	Reststoffminimierung und Reststoffrezyklierung als Beiträge zur Ressourcenschonung	8
2.1.1	Ökonomische Bedeutung von Reststoffminimierung und Rezyklierung	8
2.1.2	Ökologische Bedeutung von Reststoffminimierung und Rezyklierung.....	10
2.1.3	Technologische Bedeutung von Reststoffminimierung und Rezyklierung.....	10
2.1.4	Akzeptanzfragen der Reststoffminimierung und Rezyklierung	11
2.2	Optimierungspotenziale ausgewählter Rezyklierungsprozesse	11
2.2.1	Rezyklierung von Dünnschicht-Photovoltaik-Zellen.....	11
2.2.2	Reinigung und Rezyklierung von parasitär bei der Sputtertechnologie abgelagerter dünner Schichten	12
2.2.3	Säuberung und Entlackung metallischer Strukturen	12
2.2.4	Rezyklierung von Bauabfällen	13
2.2.5	Dekontamination zur Instandhaltung und zum Rückbau kerntechnischer Anlagen	13
2.3	Einsatz der Hochleistungs-Lasertechnologie zur optimierten Ressourcenschonung	14
2.3.1	Rezyklierung von Dünnschicht-Photovoltaik-Zellen.....	16
2.3.2	Reinigung und Rezyklierung von parasitär bei der Sputtertechnologie abgelagerter dünner Schichten	18
2.3.3	Säuberung und Entlacken metallischer Strukturen	19
2.3.4	Rezyklierung von Bauabfällen	19
2.3.5	Dekontamination für die Instandhaltung und für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	20

3	Dekontamination in kerntechnischen Anlagen	22
3.1	Nuklearer Rückbau, Reststoffe und Entsorgungswege	22
3.2	Kontamination an Betonstrukturen	24
3.2.1	Radioaktive Kontamination	24
3.2.2	Chemisch-toxische Kontamination	25
3.3	Dekontaminationstechnologien bei der Instandhaltung und beim Rückbau kerntechnischer Anlagen.....	29
3.3.1	Mechanische Verfahren	29
3.3.2	Chemische Verfahren.....	31
3.3.3	Thermische Verfahren.....	31
3.3.4	Dekontaminationskosten radioaktiv belasteter Betonstrukturen beim Einsatz konventioneller Technologien	32
3.3.5	Dekontaminationskosten chemisch-toxisch belasteter Betonstrukturen beim Einsatz konventioneller Technologien	34
3.4	Stand von Wissenschaft und Technik der Laserdekontamination.....	36
3.4.1	Laserdekontamination radioaktiv belasteter Betonstrukturen.....	36
3.4.2	Laserdekontamination beschichteter Betonstrukturen	40
3.5	Konkretisierung der Aufgabenstellung.....	43
3.5.1	Laserdekontamination radioaktiv belasteter Betonstrukturen.....	43
3.5.2	Laserdekontamination chemisch-toxisch belasteter Betonstrukturen	44
4	Versuchsaufbau zur Dekontamination mittels Lasertechnologie.....	47
4.1	Versuchsaufbau zur Dekontamination radioaktiv belasteter Betonstrukturen	47
4.1.1	Verwendete Lasertechnologie	47
4.1.2	Charakterisierung der verwendeten Betonproben	47
4.1.3	Physikalische Rahmenbedingungen sowie zu erwartende Effekte	48
4.1.4	Konzeption der Versuchsanlage	51
4.2	Versuchsaufbau zur Dekontamination chemisch-toxisch belasteter Betonstrukturen	52
4.2.1	Verwendete Lasertechnologie	52
4.2.2	Charakterisierung der verwendeten lackierten Betonproben.....	52
4.2.3	Konzeption der Versuchsanlage	54

4.2.4	Physikalische Rahmenbedingungen und zu erwartende Effekte	57
5	Experimentelle Ergebnisse	62
5.1	Laserdekontamination radioaktiv belasteter Betonstrukturen	62
5.1.1	Gravimetrische Analyse der abgetragenen Masse	62
5.1.2	Makroskopische Analyse der entschichteten Flächen	64
5.1.3	Mikroskopische Analyse der abgetragenen Partikel	65
5.1.4	Analyse der Abtragtiefe und Simulation des Dekontaminationsprozesses	66
5.2	Laserdekontamination von Epoxidharzlackschichten	69
5.2.1	Charakterisierung des Verbrennungsprozesses bei der Laserentschichtung von Epoxidharzlacken.....	70
5.2.2	Makroskopische Oberflächenanalyse	72
5.2.3	Mikroskopische Oberflächenanalyse	74
5.2.4	Analyse der Reaktionsprodukte	77
5.2.5	Simulation des Dekontaminationsprozesses	78
5.2.6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse mit Epoxidharzlack	83
5.3	Laserdekontamination von PCB-haltigen Lackschichten	86
5.3.1	Charakterisierung des Verbrennungsprozesses bei PCB-haltigen Lacken	86
5.3.2	Makroskopische Oberflächenanalyse	90
5.3.3	Mikroskopische Oberflächenanalyse	93
5.3.4	Analyse der Reaktionsprodukte auf Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/F)	94
5.3.5	Evaluierung der Ergebnisse der Laserdekontamination PCB-haltiger Lackschichten	97
6	Ganzheitliche Verfahrensbewertung	101
6.1	Ökonomische Verfahrensbewertung	101
6.1.1	Bewertung der Laserdekontamination radioaktiv belasteter Betonstrukturen.....	102
6.1.2	Bewertung der Laserdekontamination chemisch-toxisch belasteter Betonstrukturen	103
6.2	Ökologische Verfahrensbewertung	104
6.2.1	Bewertung der Laserdekontamination radioaktiv belasteter Betonstrukturen.....	104
6.2.2	Bewertung der Laserdekontamination chemisch-toxisch belasteter Betonstrukturen	105
6.3	Technologische Verfahrensbewertung	105
6.4	Akzeptanz von Technologien zur Laserdekontamination	107

6.5	Evaluierung der verwendeten Verfahren.....	108
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
8	Literaturverzeichnis	113
9	Abkürzungsverzeichnis.....	121
10	Verzeichnis der Formelzeichen	123
11	Abbildungsverzeichnis.....	125
12	Tabellenverzeichnis	129