

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung .....	4
2 Stand des Wissens .....	6
2.1 Definition von Koordinatensystemen .....	7
2.1.1 Ortsfestes Koordinatensystem .....	7
2.1.2 Fahrzeugfestes Koordinatensystem .....	7
2.2 Präventiver Steinschlagschutz .....	8
2.2.1 Lackierung und Lackaufbau .....	8
2.2.2 Steinschlagschutzfolien und PVC-Beschichtungen .....	9
2.2.3 Konstruktiver Steinschlagschutz .....	10
2.3 Theorien zum Steinabwurf .....	11
2.3.1 Aufnahmemechanismus von Steinen am Reifen .....	11
2.3.2 Kinetik der Steinmitnahme und des Abwurfs vom Reifen .....	14
2.4 Direkte Einflussparameter auf den Abwurf von Steinen .....	17
2.4.1 Reifen .....	18
2.4.2 Parameter des Fahrzustands .....	19
2.4.3 Einflussfaktor Fahrbahn .....	20
2.4.4 Auftreffwinkel .....	21
2.4.5 Umgebungsbedingungen .....	21
2.5 Theorien zum Steinaufprall und dadurch induzierte Lackschädigung .....	22
2.5.1 Lackaufbau unterschiedlicher Substrate .....	22
2.5.2 Belastungsverhältnisse im Schichtsystem beim Stoßvorgang .....	24
2.5.3 Schädigungsvorgang bei einer Stoßbelastung .....	27
2.5.4 Kinetische Energie und Schädigung beim Steinaufprall .....	29
2.5.5 Durchschlagverhalten von Projektilen auf einen Panzer .....	29
2.6 Numerische Simulation der Steinschlagschädigung .....	30
3 Gegenstand der Arbeit .....	32
4 Experimente .....	34
4.1 Analyse des Steinabwurfs im Fahrbetrieb .....	34
4.1.1 Versuchsaufbau .....	34
4.1.1.1 Ortsfester Versuchsaufbau .....	36

4.1.1.2 Reifen .....	38
4.1.1.3 Versuchsstrecke und verwendete Projektile .....	39
4.1.1.4 Versuchsdurchführung.....	39
4.1.1.5 Methodik der Auswertung .....	41
4.1.2 Fahrzeugfestes Kamerasystem .....	44
4.1.2.1 Versuchsaufbau.....	44
4.1.2.2 Versuchsreihe .....	45
4.2 Analyse der Oberflächenschädigung anhand von Steinschlagversuchen .....	46
4.2.1 Versuchsaufbau .....	46
4.2.1.1 Berechnung und methodische Beschreibung des Fallturms .....	48
4.2.1.2 Projektile .....	50
4.2.2 Versuchsdurchführung.....	53
4.3 Steinschlagsimulation .....	55
4.3.1 Vergleichsanalyse der Simulationsergebnisse zu realen Schädigungen .....	56
4.3.2 Methodik zur Quantifizierung von Lackschäden durch Steinschlag .....	56
4.3.2.1 Visuelle Schadensauswertung.....	56
4.3.2.2 Digitale Schadensauswertung .....	57
5 Auswertung der Ergebnisse.....	60
5.1 Ergebnisse des Steinabwurfs .....	60
5.1.1 Ergebnisse der Versuchsfahrten mit ortsfesten Kamerasystem .....	60
5.1.1.1 Versuchsreihe: Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit .....	60
5.1.1.2 Versuchsreihe: Beschleunigung .....	67
5.1.1.3 Versuchsreihe: Verzögerung .....	74
5.1.1.4 Versuchsreihe: Regenfahrt .....	76
5.2 Auswertung der Oberflächenschädigung.....	77
5.2.1 Versuchsreihe 1: Einfluss des Auftreffwinkels des Projektils Stein .....	77
5.2.2 Versuchsreihe 2: Reduzierung der Parameter von Versuchsreihe 1 .....	79
5.2.3 Versuchsreihe 3: Einfluss des Auftreffwinkels mit Dodekaeder-förmigen Projektilen unter definierten Bedingungen .....	80
5.2.4 Versuchsreihe 4: Reduzierung der Parameter von Versuchsreihe 3 .....	81
5.2.5 Versuchsreihe 5: Einfluss des Auftreffwinkels von 90° mit Dodekaeder-förmigen Projektilen zur Bestimmung des empirischen Faktors k .....	82
5.3 Schädigungsanalyse für die Steinschlagsimulation .....	83
5.3.1 Vergleichsanalyse der Oberflächen nach Splitterprobung .....	83
5.3.2 Methodik zur Schadensauswertung.....	85

6 Diskussion der erzielten Ergebnisse .....	88
6.1 Analyse des Mechanismus beim Steinabwurf.....	88
6.2 Quantifizierung der Oberflächenschädigung.....	93
6.2.1 Charakterisierung der verschiedenen Einschlagsformen.....	93
6.2.1.1 Einschlagsform 1 .....	94
6.2.1.2 Einschlagsform 2 .....	95
6.2.1.3 Einschlagsform 3 .....	97
6.2.1.4 Einschlagsform 4 .....	97
6.2.1.5 Einschlagsform 5 .....	98
6.2.1.6 Einschlagsform 6 .....	99
6.2.1.7 Einschlagsform 7 .....	100
6.2.1.8 Einschlagsform 8 .....	100
6.2.1.9 Verteilung der Einschlagsformen .....	101
6.2.2 Anwendung der Panzerformel in der Steinschlagauswertung .....	103
6.2.2.1 Entwicklung einer Steinschlagformel .....	105
6.2.2.2 Anwendung der modifizierten Panzerformel beim Projektil Stein.....	105
6.2.2.3 Anwendung der modifizierten Panzerformel bei Dodekaeder-förmigen Projektilen.....	106
6.3 Weiterentwicklung der Steinschlagsimulation .....	110
6.3.1 Steinschlagsimulationstool.....	110
6.3.1.1 Bewertung der Schädigung.....	111
6.3.1.2 Steinschlagbewertung mithilfe von positionsabhängigen Grenzwerten zum Auftreffwinkel .....	112
6.3.1.3 Analyse der Abweichung vom Grenzwert .....	112
6.3.1.4 Darstellung der Abweichung des Auftreffwinkels vom Grenzwert in 3D .....	113
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	114
8 Quellen- und Literaturverzeichnis .....	119
9 Anhang .....	126