



Gilda Karbasi

Entwicklung eines Schädigungsmodells für den Einsatz in der Steinschlagsimulation

Audi-Dissertationsreihe, Band 132

Entwicklung eines Schädigungsmodells für den Einsatz in der Steinschlagsimulation

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurin
genehmigte Dissertation

von
M.Sc. Dipl.-Ing.(FH) Gilda Karbasi

2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018
Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2018

Vorsitz der Prüfungskommission: Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Glasmacher

1. Referent: Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Wallaschek
2. Referent: Herr Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier
3. Referent: Herr Prof. Dr. rer. nat. habil. Günter Schmitt

Tag der Promotion: 20. März 2018

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9846-9

eISBN 978-3-7369-8846-0

Danksagung

Diese Dissertation möchte ich meiner lieben Familie widmen, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Durch ihre moralische Unterstützung und Liebe ermöglichte sie mir schöne und lehrreiche Jahre.

Mein besonderer Dank geht an meine Professoren.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Wallaschek möchte ich hierbei besonders für die ausgezeichnete Betreuung während der letzten Jahre danken.

Die freundlichen Treffen in Hannover und Ingolstadt sowie die guten Anregungen und Ratschläge werden mir stets in guter Erinnerung bleiben. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier möchte ich mich für die guten Anmerkungen zu meiner Dissertation und die Übernahme als zweiten Referenten sehr bedanken.

Vor allem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Günter Schmitt für seine langjährige Unterstützung bedanken. Er hat stets an meine Fähigkeiten geglaubt und mich ermutigt, neue Wege zu erkunden.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Matthias Brettmann für die hervorragende Unterstützung bedanken. Mit Sachverstand bei komplexen Fragenstellungen und vor allem mit persönlichem Einsatz, stand er mir immer stets mit Rat und Tat zur Seite.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den gesamten Mitarbeitern und Kollegen der Abteilung Korrosionsschutz und Umweltsimulation der AUDI AG, welche mir bei Fragen stets hilfsbereit zur Seite standen und mich unterstützten.

Zum Schluss möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Herbert Schnattinger für die interessante Aufgabenstellung bedanken. Durch ihn ist dies Promotionsprojekt überhaupt erst möglich geworden.

Vielen Dank!

Abstract

Development of a damage model for use in the stone chipping simulation

The computerized simulation of stone chipping is necessary to detect impact zones on the coating system of the vehicle's body and chassis in the early development or concept phase. The validation of the stone impact is currently made by geometrical analysis of the angle of stone impact. The simulation tool currently used for this analysis is "Pebbles II". However, the current methods for simulation cannot be used for forecasting precisely the damage on the coating system caused by stone chipping.

The aim of this work was to enhance the quality of the stone chipping simulation in terms of surface and coating system damages. Therefore, two different approaches were used. Based on practical experiments with a vehicle and different tires, the trajectories of stones were determined by using high-speed recordings. The stone impact and the induced damage on the coating system, on the other hand, was analyzed by a 15-meter-high experimental setup to determine the essential parameters. The objective of this experimental was to derive a model based on repeatable tests for describing the penetration power of stones on the coating system. For evaluation of this model, the results of damages on the impact zones from the driving experiment were compared with the results from the 15-meter-high experimental setup. The perception of both experiments was familiarized into the "Pebbles II" simulation tool to describe the resulting damage.

Schlagwörter:

Simulation of stone chipping, Pebbles II, Panzer formula

Entwicklung eines Schädigungsmodells für den Einsatz in der Steinschlagsimulation

Die Steinschlagsimulation beschäftigt sich mit dem vom Reifen ausgehenden Eigenbewurf durch Steine an der Karosserie und am Fahrwerk. Gegenwärtig läuft die Steinschlagbewertung rein geometrisch über die Ermittlung der Auftreffwinkel im Simulationstool „Pebbles II“. Die derzeit verfügbaren Methoden zur Simulation erlauben keine Vorhersagen zur Schädigung von Oberflächen durch Steinschlag.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Aussagequalität der Steinschlagsimulation im Hinblick auf die Oberflächenschädigung zu verbessern. Dafür wurden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Anhand von praktischen Versuchen wurden zum einen Abwurfprofile von Steinen mittels Aufnahmen per High-Speed-Kamera an einem Versuchsfahrzeug im Feldversuch ermittelt. Zum anderen wurde mit Hilfe eines Fallturm-Prüfstands die Oberflächenschädigung durch Steinschlag aus den Feldversuchen experimentell unter definierten Bedingungen untersucht, um die wesentlichen Schädigungsparameter ausfindig zu machen. Hier war das Ziel, ein Schädigungsmodell für die Durchschlagskraft von Steinen durch die Lackschicht zu erstellen. In den Fahrversuchen wurden reale Schadensbilder aufgezeichnet, die aber wegen der großen Menge an Einflussgrößen nur schwer reproduzierbar waren. Deshalb wurden in Fallturmversuchen theoretische Schadensbilder erzeugt, die aufgrund des klar definierten Versuchsaufbaus reproduzierbare Ergebnisse aufwiesen. Um eine Brücke zwischen den Fahrversuchen und den Versuchen aus dem Fallturm ziehen zu können, wurden Schadensbilder aus dem Feld analytisch ausgewertet und mit den Schädigungen aus dem Fallturm verglichen. Die Erkenntnisse aus den praktischen Versuchen wurden in das Simulationstool „Pebbles II“ eingearbeitet, mit dem Ziel, bei einer Steinschlagsimulation die resultierende Oberflächenschädigung aus der Erprobung im Feld darzustellen.

Schlagwörter:

Steinschlagsimulation, Pebbles II, Panzerformel

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

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

A	—	Transformationsmatrix
a	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung
c	—	Widerstandsbeiwert
E	J	Energie
F	N	Kraft
g	$\frac{m}{s^2}$	Erdbeschleunigung $g = 9,807 \text{ [m/s}^2\text{]}$
k	—	Konstante
m	kg	Masse
p	m	Ortsvektor (Zykloide)
r	m	Radius
s	m	Ortsvektor (schiefer Wurf)
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
x, y, z	m	kartesische Koordinaten
\dot{x}, \dot{z}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit in kartesischen Koordinate
\ddot{x}, \ddot{z}	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung in die kartesischen Koordinaten
α, β	$Grad$	Abwurfwinkel
λ	—	Reifenschlupf
$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$	$Grad, \frac{1}{s}, \frac{1}{s^2}$	Rollwinkel, -geschwindigkeit, -beschleunigung
ω	$\frac{1}{s}$	Drehgeschwindigkeit

Indizes

a	Adhäsion	proj	Projiziert
F	Fahrzeug	R	Rad
geo	Geometrie des Körpers	rel	Relativsystem
ges	Gesamt	Stein	Projektile aus dem Splitt
h	Hysterese	St	Stoß
inertial	Inertialsystem	T	Tangential
kin	Kinetisch	W	Luftwiderstand
L	Luft	x, z	in Koordinatenrichtung
N	Normal	0	Anfang

Besondere Zeichen

(1.1) Gleichungsnummer, die erste Zahl gibt die Nummer des Kapitels an

[1] Nummer im Quellenverzeichnis

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ASR	Automatische Schlupfregelung
CAD	Computer Aided Design // rechnerunterstützte Konstruktion
CAN-Bus	Can Area Network // serielles Bussystem
CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
DOT	Designating Optical Tracker
ESC	Electronic Stability Control // Elektronische Stabilitätskontrolle
fps	Frames Per Second // Bilder pro Sekunde
GPS	Global Positioning System // Globales Positionsbestimmungssystem
KTL	Kathodische Tauchlackierung
PGN	Prüfgelände Neustadt
PKW	Personenkraftwagen
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
SG	Steinschlaggrenze
SUV	Sport Utility Vehicle // Geländelimousine
SZ	Steinschlagzone
vgl.	vergleiche
2K	Zwei-Komponenten-Lack

Begriffe und Definitionen

Inertialsystem	raumfestes (ruhendes) Bezugssystem
Pentagondodekaeder	symmetrische Fünfeckform mit 12 Flächen, 20 Ecken und 30 gleich langen Kanten.
Reifenschlupf	Verhältnis der Relativgeschwindigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn
Relativsystem	fahrzeugfestes (bewegtes) Bezugssystem
Slick	(englisch: glatt) profilloser Reifen
Strak-Geometrie	geometrische Darstellung aller kundensichtbaren Oberflächen im Interieur und Exterieur unter Berücksichtigung aller technischen und formalästhetischen Ansprüche.
Substrat	zu behandelndes Material; Probenplatte
Steinschlagpotenzial	vergrößerte Wahrscheinlichkeit von einem Stein getroffen zu werden
Trajektorie	lateinisch: Bahnkurve
Vollastbeschleunigung	mit maximalem Antriebsmoment beschleunigt „Vollgas geben“

Vorschriften und Richtlinien

DIN EN 13043	„Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen“
DIN EN 933-1	Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung

1 Einleitung

Der Erwerb eines Fahrzeuges gehört neben dem Erwerb von Immobilien zu den kostenintensivsten Ausgaben, die einige Bürger im Laufe ihres Lebens tätigen. Daher ist es verständlich, dass die Erwartungen und Ansprüche der Kunden an ihre Fahrzeuge steigen. Anforderungen wie ansprechendes Design, Qualität, Sicherheit, Komfort, Fahrleistung, etc. und vor allem Wirtschaftlichkeit sind hierbei wichtige Kriterien, um heutzutage wettbewerbsfähig zu bleiben. Premium-Herstellern wie Audi ist es wichtig, diesen steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Dabei wird Audi permanent mit gegensätzlichen Anforderungen und Problemstellungen konfrontiert. Ein ansprechendes Design gehört bei der Kaufentscheidung eines Kunden zu den wichtigsten Kriterien überhaupt. Die Herausforderung besteht darin, einen bestmöglichen Kompromiss zwischen Design und Technik herbeizuführen.

Zusätzlich spielt das Thema Zeit in den vergangenen Jahren eine immer größer werdende Rolle. Die Entwicklungszeiten für Fahrzeuge verkürzen sich, um zum einen dem globalen Wettbewerb standzuhalten und zum anderen den kürzeren Technologie-Zyklen sowie den Kundenanforderungen gerecht zu werden. Aus diesem Grund werden vermehrt rechnergestützte Simulationen eingesetzt, um physikalische Zusammenhänge in einem Modell abzubilden und dadurch Erkenntnisse über reale Systeme zu gewinnen. Diese Erkenntnisse ermöglichen in der frühen Entwicklungsphase, erste Tendenzen sowie Prognosen darzustellen, ohne eine kostenintensive Erprobung an Prototypen durchführen zu müssen.

1.1 Problemstellung

Das Gefahrenpotential durch Steinschlag im Straßenverkehr ist allgegenwärtig. Besonders in der Winterzeit werden von den Winterdiensten Splitt und Salz auf die Fahrbahn gestreut, um die Griffbarkeit der Reifen auf der Fahrbahn zu verbessern. Dabei ist der Streuverbrauch der Winterdienste in Deutschland wie in Abbildung 1.1 abgebildet, über die Jahre immer weiter gestiegen.

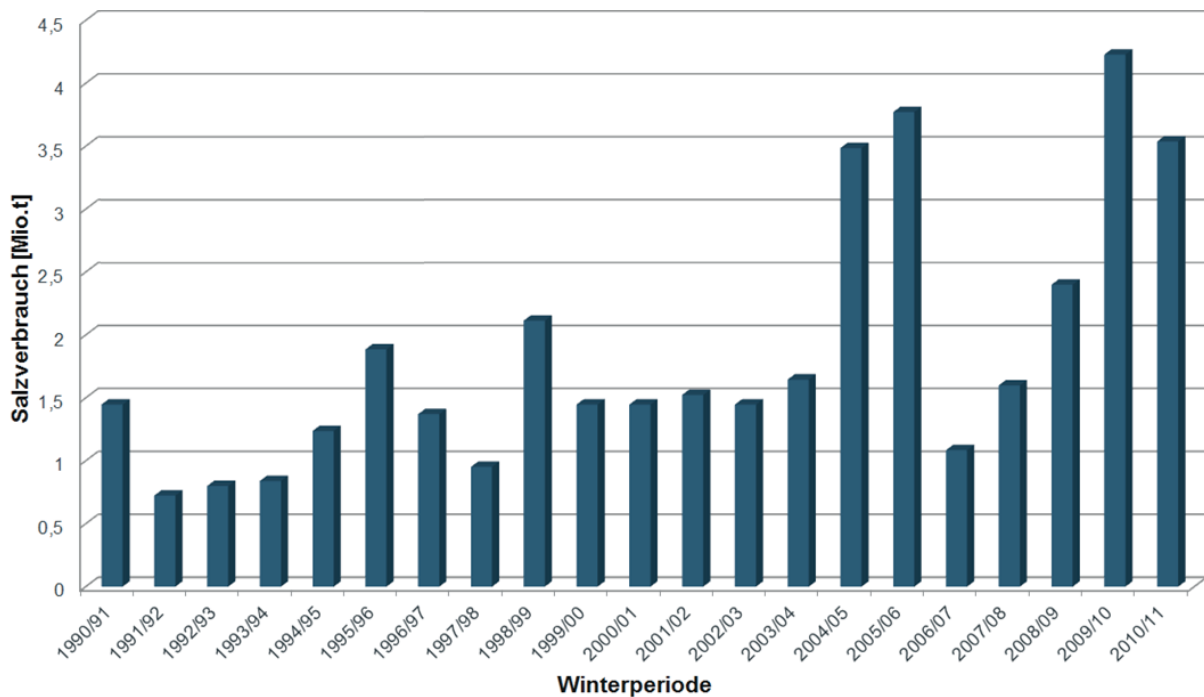


Abbildung 1.1: Darstellung des Streusalzverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland über einen Zeitraum von 20 Jahren [1]

Beim Überfahren von Splitt und Salz werden kleine Steine durch die Räder der Fahrzeuge abgeworfen und führen dabei zu Schädigungen, wenn sie das eigene oder ein anderes Fahrzeug treffen. Hierbei wird zwischen zwei Arten von Steinschlägen unterschieden. Die bekannteste Art sind Steinschläge durch Fremdbewurf, wie beispielsweise Steinschlag an der Windschutzscheibe oder als kleine Lackabplatzungen auf der Motorhaube, die durch voraus- bzw. vorbeifahrende Fahrzeuge verursacht werden.

In dieser Dissertation geht es um die Steinschlagbelastung durch Eigenbewurf, welcher durch die Reifen des eigenen Fahrzeugs verursacht wird. Die Beschädigungen beim Eigenbewurf beziehen sich auf die Karosserie, das Fahrwerk und die am Fahrzeugunterboden verbauten Komponenten.

In den für den Kunden sichtbaren Bereichen der Karosserie, wie Tür, Schweller, Kotflügel und Seitenwandrahmen gelten heutzutage verschärfte Kriterien. Dies führt zu dem Problem, dass die Lackoberfläche der Karosserieaußenhaut geometrieabhängig abgestrahlt wird. Die Folge sind Lackvermattungen und im schlimmsten Fall, abhängig vom Grundmaterial, Korrosion an den beschädigten Stellen.

Es wird daher versucht, eine hohe Steinschlagbelastung bereits in der frühen Entwicklungsphase eines Fahrzeuges durch konstruktive Änderungen zu verhindern. Diese konstruktiven Maßnahmen beziehen sich hauptsächlich auf die Strak-Geometrie (Seitenkontur), welches das Design der Karosserie maßgeblich beeinflusst. Gleichzeitig muss das Gesamtdesign des Fahrzeugs berücksichtigt werden.

Zur frühzeitigen Diagnose der steinschlaggefährdeten Bereiche ist eine computerbasierte Simulation notwendig. Mithilfe der Steinschlagsimulation können Problemstellen bereits in der frühen Entwicklungsphase aufgezeigt und Schutzmaßnahmen generiert werden. Momentan werden zur Verifizierung der Simulationsergebnisse zeitaufwendige und kostenintensive Erprobungen mit Versuchsträgern unter definierten Bedingungen durchgeführt. Bei Erprobungen mit hoher Steinschlagbelastung werden zum Schutz vor Steinschlägen im sichtbaren Bereich präventive Schutzmaßnahmen wie beispielsweise eine Polyvinylchlorid-Beschichtung (PVC-Beschichtung) am Schweller eingesetzt. Die PVC-Beschichtung wird vor der Decklackierung aufgetragen. Die raue Oberfläche schränkt die Erkennbarkeit von Steinschlägen ein. Eine weitere Maßnahme ist die Steinschlagschutzfolie (Polyurethanfolie), welche zum Schutz von lackierten Bereichen auf die Fahrzeugoberfläche und auf dem Klarlack appliziert wird. Die Größe, Position und Form der Folien werden aus Versuchen (Steinschlagsimulation und Erprobungen) empirisch ermittelt. Der Einsatz von Steinschlagschutzfolien erfordert jedoch beträchtliche Kosten pro Fahrzeug. Zudem ist die Sichtbarkeit der Folie, besonders bei hellen Lackierungen, von Nachteil.

Um die spätere Aufbringung von Schutzfolien einzusparen, wird am Anfang der Entwicklungsphase mit Hilfe der Steinschlagsimulation die Strak-Geometrie überprüft, um die dadurch gewonnenen Erkenntnisse frühzeitig in die Gestaltung der Seitenkontur einfließen zu lassen. Änderungen der Seitengeometrie zu einem späteren Zeitpunkt im Projektverlauf erzeugen hohe Kosten. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 1.2 grafisch dargestellt. Der „Projektfortschritt“ stellt hierbei den Fortschritt der einzelnen Entwicklungsphasen in der Automobilindustrie dar, um ein neues Fahrzeug von den ersten Planungen bis zum Produktionsstart auf den Markt zu bringen.

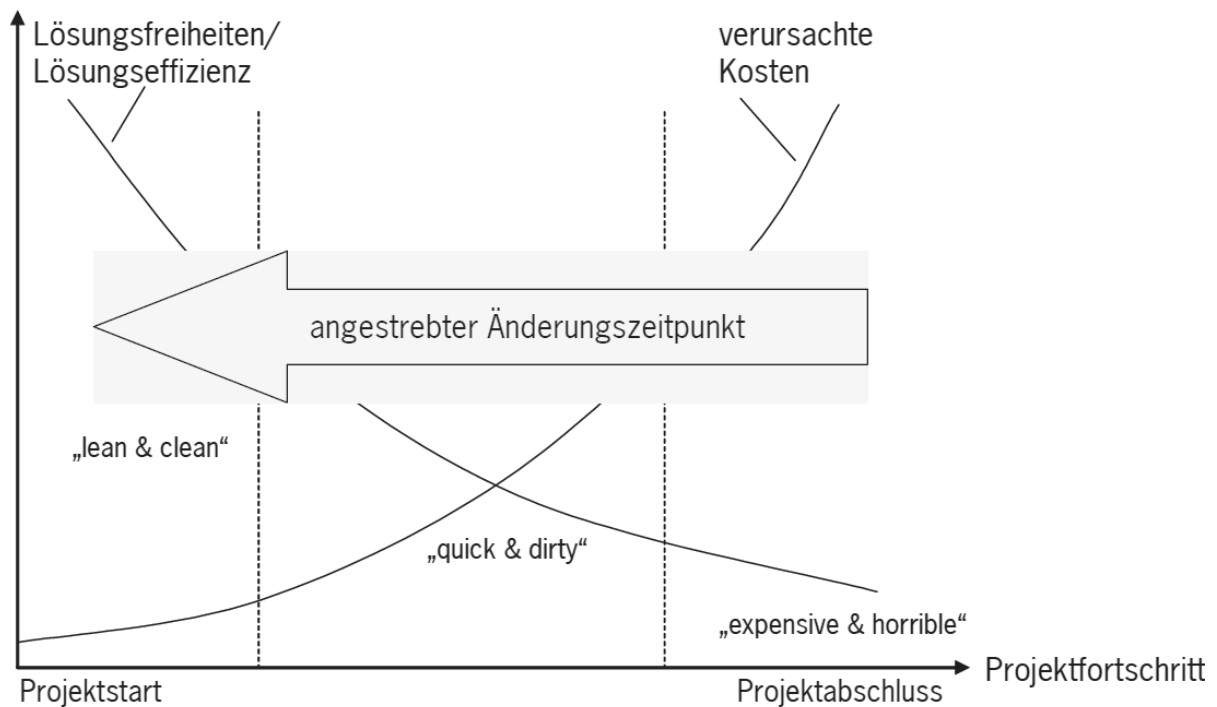


Abbildung 1.2: Änderungsmöglichkeiten und dadurch verursachten Kosten über die Projektlaufzeit [2]

1.2 Zielsetzung

Die Steinschlagsimulation beschäftigt sich mit dem vom Reifen ausgehenden Eigenbewurf durch Steine an Karosserie und Fahrwerk. Gegenwärtig läuft die Steinschlagbewertung rein geometrisch über die Ermittlung der Auftreffwinkel im Simulationstool „Pebbles II“ [3, 4]. Die derzeit verfügbaren Methoden zur Simulation erlauben keine Prognosen zur Schädigung von Oberflächen durch Steinschlag. Das Ziel dieser Dissertation war es, die Aussagequalität der Steinschlagsimulation im Hinblick auf die Oberflächenschädigung zu verbessern. Hierzu mussten Abwurfprofile von Steinen in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter, wie beispielsweise Fahrgeschwindigkeit, Fahrsituationen und Bereifung ermittelt werden. In diesem Zusammenhang galt es, bestehende Hypothesen zum Steinabwurf zu verifizieren oder zu modifizieren, z.B. die Hypothesen „Kleine Steine und andere Partikel werden vom angetriebenen Reifen abgeworfen, da der Reifen mit seinem Profil, wie eine Schaufel wirkt“, oder: „Die Menge der vom Reifen abgeworfenen Steine nimmt mit der Fahrgeschwindigkeit zu“.

Des Weiteren galt es, ein Modell für die Lackschädigung durch Steinschlag zu erstellen. Hierzu war es erforderlich, belastbare Daten zur Charakterisierung der

Aufprallenergie und -wirkung von abgeworfenen Steinen unterschiedlicher Form und Masse experimentell zu ermitteln. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen wurden in das Simulationsprogramm integriert, um am Ende eine verbesserte Aussagequalität zur Oberflächenschädigung durch Steinschlag zu erzielen. Die Abbildung 1.3 beschreibt die gewählte Vorgehensweise von der Analyse des Abwurfvorgangs und der daraus entstehenden Oberflächenschädigung bis zur Integration der Ergebnisse in die Weiterentwicklung der Steinschlagsimulation.

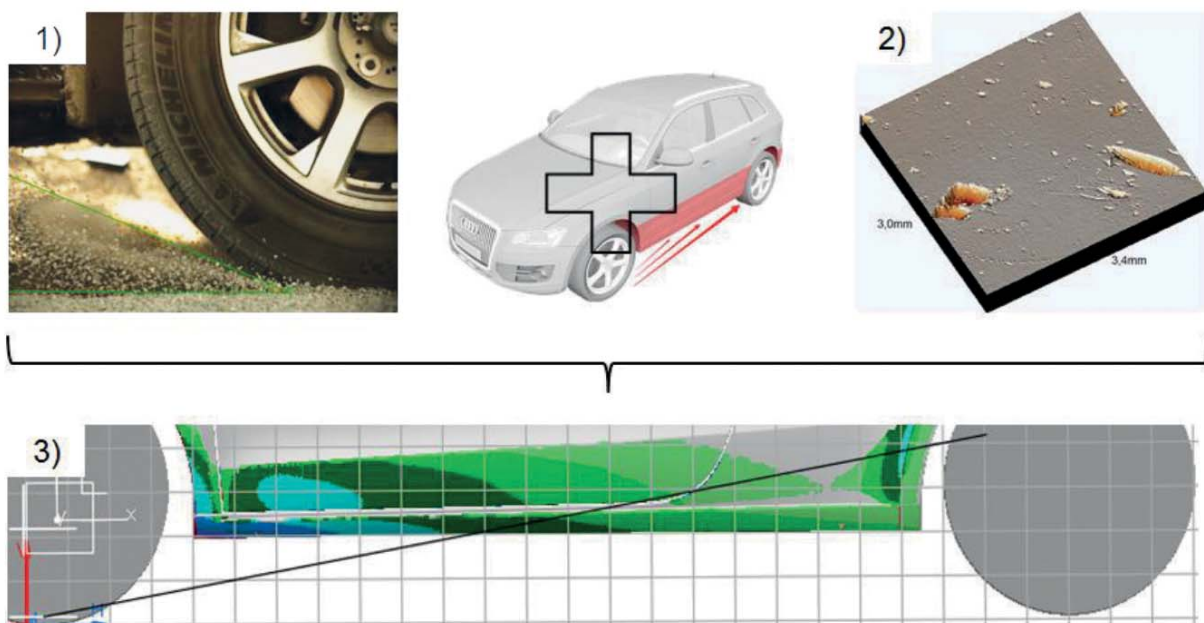


Abbildung 1.3: Übersicht der Vorgehensweise in drei Teilschritten: 1) Analyse des Abwurfvorgangs, 2) Analyse der Oberflächenschädigung bei verschiedenen Auftreffwinkeln, 3) Optimierung des Steinschlagsimulationsmodells

2 Stand des Wissens

Fahrzeuge sind im Fahrbetrieb vielen Belastungen ausgesetzt. Diese lassen sich in umwelt- und fahrzeugspezifische Belastungen unterteilen. Insbesondere die umweltspezifischen Belastungen wie Steinschlag veranlassen die Automobilindustrie bereits in der frühen Entwicklungsphase, steinschlaggefährdete Bereiche an der Karosserie zu identifizieren, um optische Beeinträchtigung und korrosive Gefährdung durch abgeworfene Steine zu verringern.

Zur Definition dieser Bereiche werden Simulationen benötigt, die Steinschläge visualisieren und die jeweilige Schädigungszone an der Fahrzeugkarosserie aufzeigen, um frühestmöglich konstruktive Lösungen in der Design- und Konzeptphase umzusetzen. In dieser Arbeit wird ausschließlich das Schädigungspotential durch den Eigenbewurf von Steinen im Fahrbetrieb behandelt.

Die Steinmitnahme durch Reifen und der Aufprall von Körpern auf Materialien wurden bereits in diversen Veröffentlichungen behandelt [5-9] und auch in [10] zusammengefasst. Jedoch sind diese Methoden und Ergebnisse nur schwer in der Automobilindustrie ein- und umsetzbar. So findet sich eine fahrzeugspezifische Untersuchung des Steinschlags durch Eigenbeschuss in der Dissertation „Prognose des Steinschlags und der induzierten Korrosion am Fahrzeug“ [10]. Hierbei lag der Fokus auf dem Schutz von Unterflurkomponenten des Fahrzeuges sowie auf der Prognose der steinschlaginduzierten Korrosion.

In der Automobilindustrie werden derzeit unterschiedliche Schutzmaßnahmen wie Steinschlagschutzfolien, PVC-Beschichtungen und konstruktive Lösungen umgesetzt [29], um die Auswirkungen des Steinschlags zu verringern. Neben diesen Schutzmaßnahmen, die in Kapitel 2.2 näher erläutert werden, wurden auch Theorien entwickelt (siehe Kapitel 2.3), welche den Aufnahmemechanismus von Steinen am Reifen, die Kinetik der Steinmitnahme und den Abwurf der Steine vom Reifen behandeln. Der bisherige Wissensstand zu den Einflussparametern bei der Steinmitnahme sowie beim Abwurf wird in Kapitel 2.4 detailliert diskutiert. Kapitel 2.5 erläutert die Theorien zum Steinaufprall und zur dadurch induzierten Lackschädigung. Hierzu werden der Lackaufbau auf unterschiedlichen Substraten sowie die Belastungsverhältnisse im Schichtsystem beim Stoßvorgang dargestellt und die

kinetische Energie und Schädigung beim Aufprall eines abgeworfenen Steines erläutert. Abschließend wird im Kapitel 2.6 die Thematik der numerischen Simulation des Steinschlages durch die Simulations-Software „Pebbles II“ [3] in der frühen Fahrzeugkonzeptphase behandelt. Im folgenden Kapitel wird zunächst auf die diversen Koordinatensysteme eingegangen.

2.1 Definition von Koordinatensystemen

Koordinatensysteme und fahrdynamisch relevante Größen werden nach der DIN 7000 „Fahrzeugverhalten und Fahrdynamik“ [11] definiert. Hierbei wird zwischen dem ortsfesten, fahrzeugfesten, sowie Rad-Koordinatensystem unterschieden. Insbesondere das ortsfeste und fahrzeugfeste Koordinatensystem werden im Folgenden kurz vorgestellt (Abbildung 2.1) und auch im Weiteren dieser Arbeit verwendet [12].

2.1.1 Ortsfestes Koordinatensystem

Das ortsfeste Koordinatensystem ist ein an einen Ort gebundenes Koordinatensystem, in dem die Relativbewegung eines Fahrzeugs im Raum beschrieben werden kann. In der Fahrbahnebene liegen hierbei die X_E - und die Y_E -Achse, die Z_E -Achse zeigt wiederum aus der Fahrbahn heraus nach oben. Die Koordinaten beschreiben somit die Bewegung eines Fahrzeugs aus der Sicht eines nicht-bewegten Beobachters [12].

2.1.2 Fahrzeugfestes Koordinatensystem

Bei dem fahrzeugfesten Koordinatensystem befindet sich der Ursprung üblicherweise im Schwerpunkt des Fahrzeugs. Hierbei ist die X_V -Achse waagrecht und nach vorne ausgerichtet (Fahrzeuginnenmittelebene). Die Y_V -Achse steht wiederum senkrecht auf der Fahrzeuginnenmittelebene und zeigt nach links. Die Z_V -Achse zeigt vom Fahrzeugschwerpunkt aus nach oben [12].

Bei dem Koordinatensystem des Reifens hingegen befindet sich der Ursprung auf der Reifenaufstandsfläche. Hierbei ist die X_W -Achse waagrecht und nach vorne ausgerichtet. Die Y_W -Achse steht wiederum senkrecht auf der Mittelebene und zeigt nach links. Die Z_W -Achse zeigt vom Reifenschwerpunkt aus nach oben.

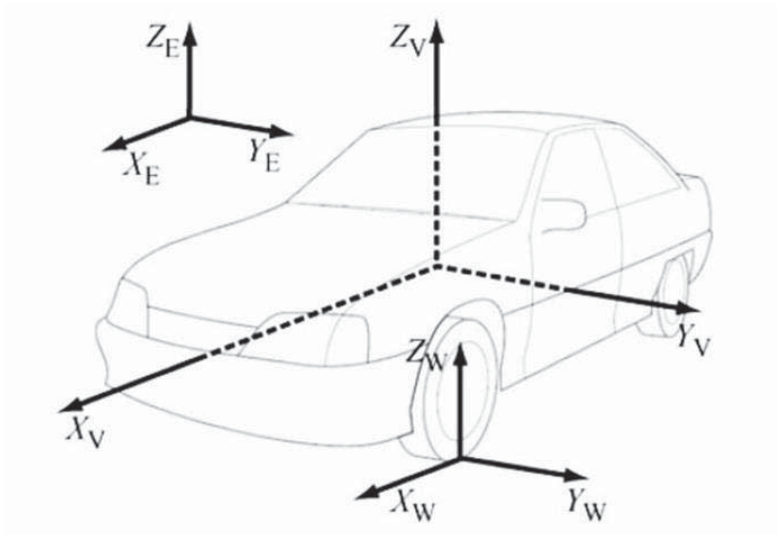


Abbildung 2.1: Koordinatensysteme nach DIN 7000: Ortsfestes und fahrzeugfestes Koordinatensystem [11]

2.2 Präventiver Steinschlagschutz

Die optische Beeinträchtigung und korrosive Gefährdung der Fahrzeugkarosserie durch abgeworfene Steine ist ein bekanntes Problem der Automobilbranche. Um diese Auswirkungen zu verringern, werden derzeit unterschiedliche Schutzmaßnahmen an Fahrzeugen umgesetzt, welche im Folgenden erläutert werden.

2.2.1 Lackierung und Lackaufbau

Die Gefahr der korrosiven Lackunterwanderung wird bereits mit einem gezielten Lackaufbau im Lackierprozess der Rohkarosserie reduziert. Die Entwicklung von flexiblen Zwischenschichten, wie der Füller, soll hierbei das Durchschlagen bis zum Substrat verhindern. Die Abbildung 2.2 verdeutlicht hierbei den Aufbau des Lacks auf dem Substrat. Die Energie eines Steinschlages muss bereits im Basislack oder im Füller aufgenommen werden, um das Freilegen des Substrats zu verhindern. Der Füller, der ca. 30 bis 40 μm stark ist, nimmt durch seine Bestandteile die größte Energie der Steinschläge auf und verringert damit weitgehend ein Durchdringen der Steine bis zum Substrat [13]. In der Karosserielackierung wird insbesondere ein farbiger Füller eingesetzt, um den entstandenen Schaden optisch zu kaschieren. Optisch sichtbare Schäden können jedoch damit nicht komplett verhindert werden, da es im Falle vieler Einschläge auf einem kleinen Bereich zur Vermattung des Lacks kommt.

Klarlack	30 - 50 μm
Basislack	10 - 25 μm
Füller	35 - 35 μm
KTL	17 - 22 μm
Vorbehandlung	
Substrat	
Karosserie	

Abbildung 2.2: Lackaufbau einer Fahrzeuglackierung auf einer Karosserieaußenhaut aus Stahl [14]

Zur Vermeidung von Schäden sowie Vermattung der Lackoberfläche von besonders steinschlaggefährdeten und für den Kunden sichtbaren Karosseriebereichen werden mehrere präventive Maßnahmen im Produktionsprozess umgesetzt.

2.2.2 Steinschlagschutzfolien und PVC-Beschichtungen

Eine vorbeugende Maßnahme gegen Steinschlagschäden ist unter anderem der Einsatz von Steinschlagschutzfolien an besonders gefährdeten Stellen von Türen oder Seitenwandrahmen (Abbildung 2.3). Diese Folien bestehen aus Polyurethan und haben meist eine Dicke von ca. 100 μm . Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften wird die kinetische Energie der auftreffenden Steine dissipiert und Schäden am Lackaufbau verhindert.

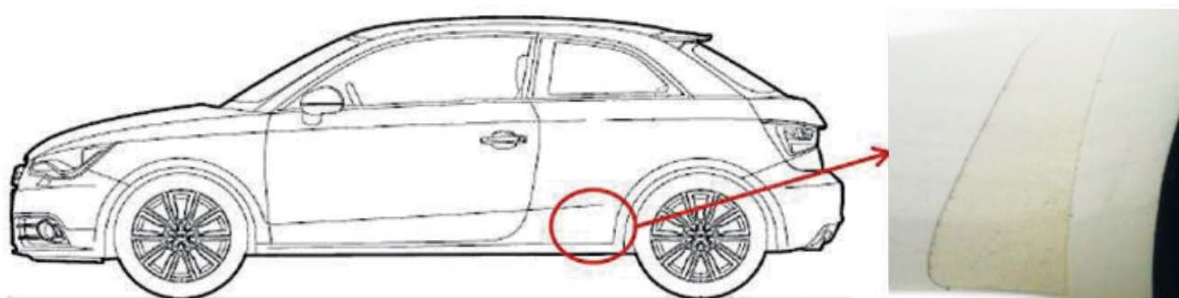


Abbildung 2.3: Steinschlagschutzfolie, beispielhaft an einem Audi A1 dargestellt

Trotz der Transparenz der Folien müssen Einbußen bezüglich der Fahrzeugoptik hingenommen werden, da im Laufe der Zeit die Folie unter Einwirkung von UV-Strahlung vergilbt und zudem Schmutzansammlungen an den Kanten der Folie entstehen.

Eine weitere Möglichkeit des präventiven Steinschlagschutzes bietet eine PVC-Beschichtung an der Unterkante des Schwellers (Abbildung 2.4). Im Gegensatz zur Steinschlagschutzfolie weist die PVC-Beschichtung eine bessere Alterungsbeständigkeit auf, hat dabei jedoch eine wesentlich rauere Oberflächenqualität. Die Polyvinylchloridbeschichtung reduziert, wie auch die Schutzfolie, die kinetische Aufprallenergie des Steines auf die Lackierung der Karosserieaußenhaut.

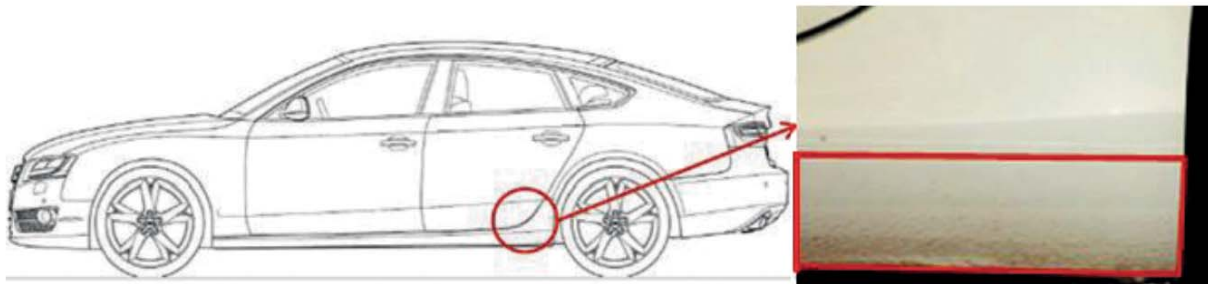


Abbildung 2.4: PVC Beschichtung am Schweller (rot markiert), beispielhaft an einem Audi A5 Sportback dargestellt

Neben den optischen Beeinträchtigungen dieser Steinschlagschutzsysteme stellen die zusätzlichen Kosten bei der Fahrzeugherstellung ein weiteres Problem dar. Von daher besteht das Ziel, steinschlaggefährdete Montage- und Karosserieteile frühzeitig in der Entwicklungsphase zu identifizieren und konstruktiv zu berücksichtigen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können im Anschluss Schweller oder die Form der Schweller entsprechend weiterentwickelt werden, um das Fahrzeug im Fahrbetrieb gegen vom Reifen ausgehenden Steinwurf zu schützen.

2.2.3 Konstruktiver Steinschlagschutz

Bereits in der Fahrzeug-Konzeptphase wird darauf geachtet, dass die Steinbeschussflächen durch eine geeignete Formgebung der Karosserie möglichst gering gehalten werden. Schweller und Türleisten werden so gestaltet, dass darüber liegende Lackflächen idealerweise vollständig vor Steinbeschuss geschützt sind. Als Beispiel dient Abbildung 2.5, die drei verschiedene Möglichkeiten zeigt, den Fahrzeugseitenwandrahmen vor aufgewirbelten Steinen zu schützen. In den Schnitten I und III ist die Türunterkante im Karosserievolumen nach innen versetzt, wohingegen bei Schnitt II eine Leiste am unteren Türrand die darüber liegende Lackschicht schützt.

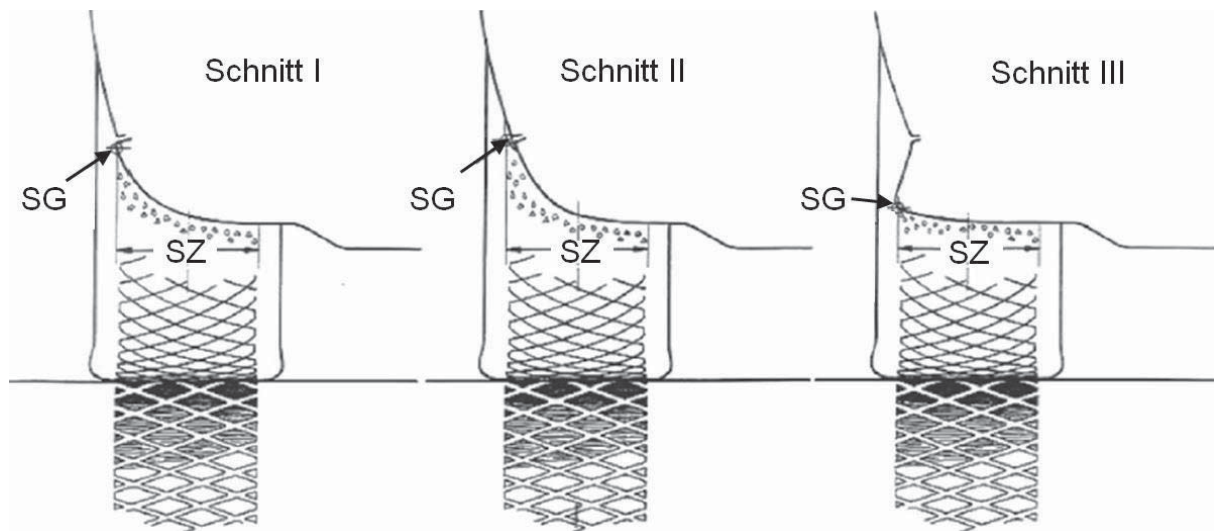


Abbildung 2.5: Konstruktive Möglichkeiten zur Reduktion der Steinschlagzone (SZ) bzw. Steinschlaggrenze (SG) am Fahrzeug [15]

Durch den konstruktiven Steinschlagschutz kann der steinschlaggefährdete Bereich am Fahrzeug stark reduziert und somit der Einsatz von Steinschlagschutzfolien vermieden werden. Hierdurch bestehen jedoch für die Designer Einschränkungen in der Gestaltungsfreiheit, sowie mögliche Komforteinbußen beim Ein- und Aussteigen durch die benötigten breiten Schweller. Allerdings bieten konstruktive Maßnahmen den besten Steinschlagschutz.

2.3 Theorien zum Steinabwurf

Die Theorien zum Steinabwurf beinhalten die Beschreibung zu den Aufnahmemechanismen der Steine durch den Reifen und erläutern die Kinetik der Steinmitnahme und den Abwurf.

2.3.1 Aufnahmemechanismus von Steinen am Reifen

Der Aufnahmemechanismus beschreibt die Grundlagen der Anhaftung von Steinen an der Lauffläche des Reifens. In der Theorie sind die Wirkmechanismen, die für eine Aufnahme des Steins durch den Reifen verantwortlich sind, die Adhäsion (intermolekulare Haftkräfte) und die Hysterese (Verzahnungskräfte). Die Adhäsion zwischen Gummi und Fahrbahn hat bei trockener Straße den größten Anteil an der Reibkraft eines Reifens [16]. Im Kontaktbereich Reifen/Straße werden abwechselnd Verbindungen gebildet, auseinandergebrochen und wieder neu gebildet. Dies sind die molekularen Wechselwirkungen im Kontaktbereich, wobei die Molekülketten des Gummis zyklisch gedehnt und unter Umständen sogar aufgebrochen werden [17]. Das

Mittel der gesamten Bindungskräfte ergibt die Adhäsionskomponente F_a (Abbildung 2.6). Das ist eine Kraft, welche der Bewegungsrichtung V entgegengesetzt gerichtet ist [18]. Wird die maximale Kraft erreicht, reißt der Kontakt ab. Im Anschluss kann sich der Effekt erneut ausbilden [18, 19]. Der Effekt ist zudem von der Gleitgeschwindigkeit in der Kontaktstelle abhängig. Bei kleinen Gleitgeschwindigkeiten ist die Adhäsionskomponente am größten [20]. Bei höheren Gleitgeschwindigkeiten wirken die Hysteresekomponente bzw. der Verzahnungseffekt.

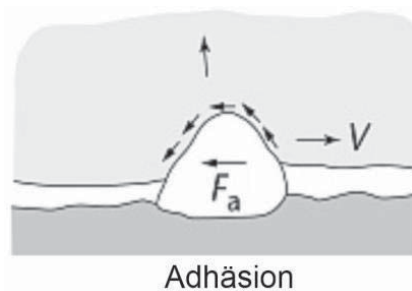


Abbildung 2.6: Kraftwirkung bei Adhäsion. Die Adhäsionskomponente F_a ist die Kraft, welche der Bewegungsrichtung V entgegengesetzt gerichtet ist [18].

Der kleinere Anteil wird durch den zweiten Wirkmechanismus, der Hysterese bzw. des Verzahnungseffektes des Gummis verursacht. Hier entsteht durch zyklische Deformation ein Dämpfungsverlust, da mehr Energie zum Komprimieren des Gummis benötigt wird, als bei der Expansion freigegeben wird. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, bekommt die resultierende Kraft, wirksam von der Fahrbahn auf den Gummi, eine Komponente F_h , die der Bewegungsrichtung V entgegenwirkt [18, 21]. Die Formänderungsarbeit des Gummis, welche nicht wiedergewonnen wird, wird in Wärme umgewandelt [20]. Dadurch erwärmt sich der Laufstreifen [10].

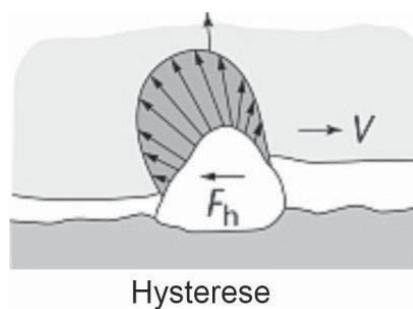


Abbildung 2.7: Kraftwirkung bei Hysterese. Die resultierende Kraft bekommt, wirksam von der Fahrbahn auf den Gummi, eine Komponente F_h , die der Bewegungsrichtung V entgegenwirkt [18].

Beide Wirkmechanismen hängen also von der Oberflächenbeschaffenheit der befahrenen Straße ab. Die Adhäsion entsteht vor allem auf glatten Oberflächen, also bei Mikrorauigkeit. Die Hysterese („Verzahnungseffekt“) hingegen wirkt bei Makrorauigkeiten. Die Definitionen der Makro- und Mikrorauigkeit zeigt Abbildung 2.8 [19].

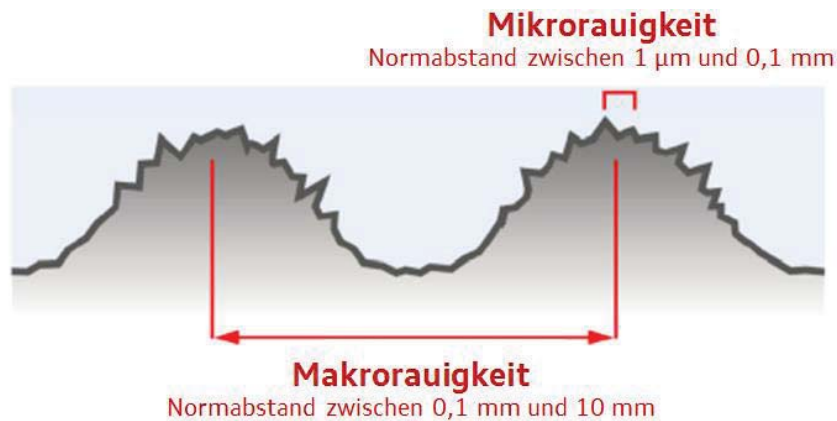


Abbildung 2.8: Mikro- und Makrorauigkeiten [19]

Befindet sich zwischen Reifen und Fahrbahn ein viskoses Medium z.B. Wasser, wird die Mikrorauigkeit geschlossen und es kann keine Adhäsionsreibung aufgebaut werden, so dass nur noch der Verzahnungseffekt wirkt. Das Wasser zwischen dem Reifen und dem einzelnen Stein reduziert somit einerseits die Adhäsion, andererseits bildet sich eine Kapillarkraft. Infolge dessen bildet sich ein charakteristischer Krümmungsradius der Flüssigkeit zwischen den beiden Oberflächen aus. Bei einem negativen Krümmungsradius werden beide Oberflächen benetzt und es entsteht wegen des Unterdruckes in der Flüssigkeit eine Kapillarkraft. Die Kapillarkräfte sind von der Korngröße der Steine abhängig. Je größer die Kontaktfläche der Steine ist, desto größer werden die Kräfte [10, 17].

Neben der Haftung der Steine auf der Reifenauflfläche können sich Steine im Profil verklemmen (Abbildung 2.9). Dazu muss das Abmaß des Steins größer als das der Profilirille sein. Durch die Radlast wird der Stein beim Überrollen in das Profil gedrückt. Hier wird er durch eine formschlüssige Kraft gehalten. Beide Komponenten werden durch das Profil bzw. Gummimischung und Geometrie des Steines beeinflusst. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und möglichen Geometrieformen der Steine, ist die Klemmkraft auf die Steine schwer zu definieren [10].

Für die mathematische Beschreibung der Zykloiden wird die Bewegungsgleichung eines Punktes aufgestellt [10, 24]. Der Ortsvektor $p(t)$ in Abhängigkeit des Radius r und Rollwinkels φ mit $\varphi = \omega \cdot t$ lautet:

$$p(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi \cdot r - \sin \varphi \cdot r \\ r - \cos \varphi \cdot r \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Aus dem Ortsvektor $p(t)$ ergibt sich durch die Bildung des Differentials der Geschwindigkeitsvektor $v(t)$ der Masse auf der Zykloiden:

$$v(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r \\ \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Aus dem Geschwindigkeitsvektor $v(t)$ kann nun eine Gesamtgeschwindigkeit v_{ges} berechnet werden, die mit Hilfe trigonometrischer Umformungen zu folgender Gleichung führt [10]:

$$v_{ges} = \dot{\varphi} \cdot r \cdot \begin{bmatrix} 1 - \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} = 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot r \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \begin{bmatrix} \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cos \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$|v_{ges}| = 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot r \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (2.4)$$

Im Scheitelpunkt ist die Geschwindigkeit des Steins waagrecht gerichtet und doppelt so groß wie die Geschwindigkeit der Achse [22]. Der Geschwindigkeitsvektor ist immer tangential zur Zykloide, demzufolge immer positiv in Fahrtrichtung gerichtet (Abbildung 2.11). Die Ausnahme stellt der Momentanpol ($\varphi = 0$) zwischen Reifenaufstandsfläche und Fahrbahn dar [10].

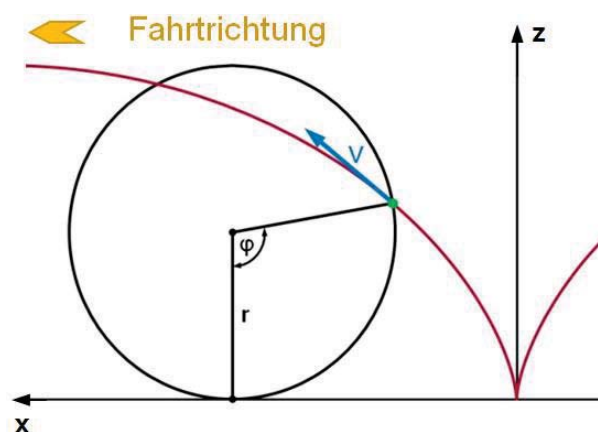


Abbildung 2.11: Geschwindigkeitsvektor und Abwurftrichtung einer Masse von einem rotierenden Rad [10]

Die Kinetik der Steinmitnahme beschreibt die Kräfte, die auf den Stein einwirken. Die Kräfte, die hier bestimmend sind, sind die Haft- sowie die Zentrifugalkraft. Die Haftkraft bildet sich aus der Adhäsion (siehe Kapitel 2.3.1) zwischen Stein und Reifen. Zuerst werden die horizontalen und vertikalen Kräfte F_x und F_z berechnet, die auf eine Masse wirken, die sich entlang der Bahnkurve bewegt [10].

$$F_x = m \cdot \ddot{x} \quad (2.5)$$

$$F_z = m \cdot \ddot{z} - m \cdot g \quad (2.6)$$

Die Beschleunigungen in x- und z-Richtung werden durch eine weitere Differenzierung der Gleichung (2.2) wie folgt berechnet:

$$a(t) = \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \cdot r \\ \ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi \cdot r \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Für die Umrechnung der Kraftkomponente im raumfesten Bewegungssystem (F_x, F_z) in die Normal- und Tangentialkomponenten am Rad (F_N, F_T) wird eine Transformationsmatrix A herangezogen.

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_N \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad A = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m \cdot (\ddot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \cdot r) \\ m \cdot (\ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi \cdot r) - m \cdot g \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Im Folgenden werden die Annahmen getroffen, dass das Rad ohne Schlupf abrollt und sich konstant dreht, die Beschleunigung des Rades $\ddot{\varphi} = 0$ sowie die Geschwindigkeit $\dot{\varphi} = \text{const.}$ sind. Daraus ergibt sich der folgende Zusammenhang für die Radialkraft F_N und die Tangentialkraft F_T :

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot m \cdot g \\ m \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot r - \cos \varphi \cdot m \cdot g \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Übersteigt die Radialkraft die Haftgrenze des Steines am Reifen, so löst sich dieser von der Oberfläche des Reifens. Nach [10] erfolgt das Lösen des Steines vom Reifen nicht sofort, sondern durch den Fortschritt eines Risses an den Grenzflächen der Kontaktpartner, welcher zum Abbrechen der Adhäsionsverbindung führt. Raue

Oberflächen, Fehlstellen oder Schmutzpartikel begünstigen diesen Rissfortschritt. Ist die Adhäsionsverbindung von dem Riss vollständig durchlaufen, löst sich der Stein und wird vom Reifen abgeworfen. Hierbei ergeben sich die Startwerte der Flugbahn aus der Kinematik der Zykloidenbewegung [10].

Wird der Abwurf im raumfesten Koordinatensystem gesehen, beschreibt die Flugbahn des Steines einen schiefen Wurf. Die Anfangsbedingungen ergeben sich aus dem tangentialen Abwurf der zykloiden Bahnkurve. Der Abwurfwinkel α wird aus den Komponenten des Geschwindigkeitsvektors (2.2) bestimmt:

$$\alpha = \arctan \frac{\dot{z}}{\dot{x}} = \arctan \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi} = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arccot} \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi} = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2} \quad (2.11)$$

Es gilt für Gleichung 2.11 der Definitionsbereich φ von $0 < \varphi < 2\pi$ [10].

Während des Fluges bleibt hierbei die x-Komponente der Geschwindigkeit unverändert, jedoch nimmt die z-Komponente aufgrund der Gewichtskraft ab:

$$v(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r \\ \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r - g \cdot t \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Liegt hierbei die Flugbahn des Steines auf Kollisionskurs mit dem Schweller, Seitenwandrahmen oder Türe des Fahrzeuges kommt es zu einer Schädigung bzw. Steinschlag [10].

2.4 Direkte Einflussparameter auf den Abwurf von Steinen

Für die Steinmitnahme sowie den Abwurf gibt es direkte Einflussparameter, die im Folgenden aufgezeigt und näher erläutert werden. Hierbei spielt insbesondere der Reifen eine tragende Rolle, da dieser eine direkte Verbindung zur Straßenoberfläche hat und durch Parameter wie Material, Innendruck, Temperatur etc. einen wesentlichen Einfluss auf die Steinmitnahme besitzt. Weitere Einflussfaktoren stellen die Parameter des Fahrzustands sowie der Fahrbahn dar. Hierbei sind unter anderen die Fahrzeuggeschwindigkeit oder die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche anzuführen. Abschließend gilt es, den Auftreffwinkel sowie die

Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte als Einflussparameter zu berücksichtigen.

2.4.1 Reifen

Der Reifen bildet die einzige Verbindung zwischen Fahrzeug und Straße und überträgt die gesamten Kräfte auf die Fahrbahn und somit auch auf die darauf befindlichen Steine. Der Einfluss des Reifens auf den Abwurf von Steinen ist durch Material und Aufbau, Profil, Radlast, Schlupf, Innendruck sowie Temperatur des Reifens gegeben. Bei heutigen Fahrzeugen sind die Reifen nach dem Radialprinzip aufgebaut (Abb. 2.12). Der Unterbau (Karkasse) verbindet die beiden Wulstkerne mit Kordfäden, die radial verlaufen. Die Steifigkeit des Reifens, welche für die Funktion notwendig ist, wird durch die Gürtellagen (Stahlgürtel und Gürtelabdecklage) erreicht. Der Fahrbahnkontakt wird vor allem durch den steifen Gürtel beeinflusst, sodass die Lauffläche eine weichere Gummimischung bzw. Materialzusammensetzung erhalten kann [20].



Abbildung 2.12: Reifenaufbau am Beispiel eines Radialreifens [26]

Die Materialzusammensetzung des Reifens beeinflusst besonders die Haftkräfte zwischen der Reifenlauffläche und der Fahrbahn. Da die Materialeigenschaften u.a. von der Temperatur abhängen, unterscheiden sich die für Sommer- und Winterreifen verwendeten Materialien, um die Reifeneigenschaften auf die veränderten äußeren Bedingungen, in Sommer und Winter, abzustimmen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen den Profilarten sowie Gummimischungen eines Sommer- und Winterreifens (Abbildung 2.13). Der Sommerreifen ist auf hohe Laufleistung, geringen Rollwiderstand und geringes Abrollgeräusch optimiert und weist einen geringeren Anteil von Negativprofilen auf. Beim Winterreifen wird großer Wert auf die optimale

Griffigkeit bei Temperaturen um den Gefrierpunkt gelegt. Für die verbesserte Verzahnung auf Schnee werden in die Profilblöcke Lamellen, Rillen und Einschnitte eingebracht, um für die erforderliche Kraftübertragung die notwendige Haftung zu gewährleisten [18].

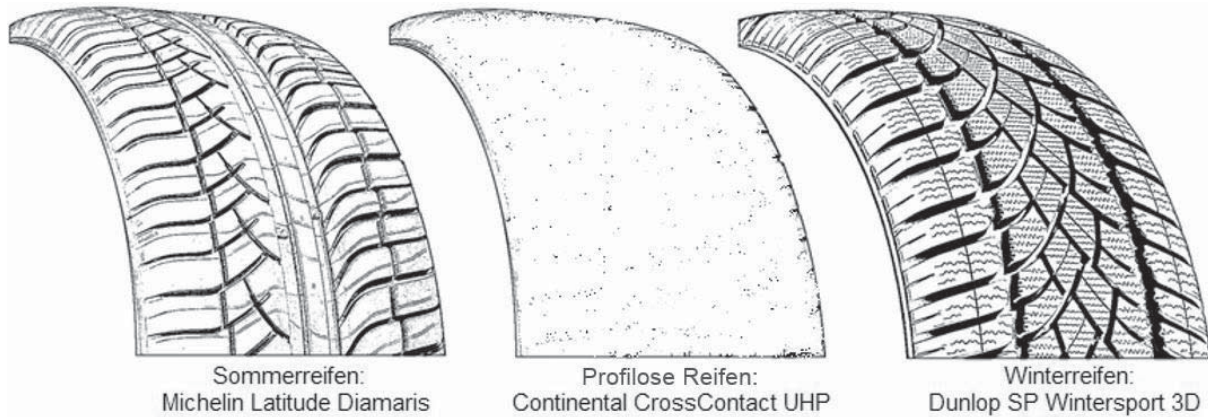


Abbildung 2.13: Reifenprofil: Beispiel für Sommer-, Slick und Winterreifen

Die Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn hängen vor allem vom Schlupf ab. Mit der Umfangsgeschwindigkeit des Reifens v_R und der Fahrzeuggeschwindigkeit v_F ist der Schlupf durch

$$\lambda_{Bes} = \frac{v_R - v_F}{v_R} \quad (2.13)$$

mit
$$v_R = \omega * r \quad (2.14)$$

definiert [28].

Stimmt die Fahrzeuggeschwindigkeit mit der Umfangsgeschwindigkeit überein, besteht kein Reifenschlupf ($\lambda_{Bes} = 0$). Der maximale Reifenschlupf ($\lambda_{Bes} = 1$) entsteht, wenn die Räder im Stand durchdrehen.

2.4.2 Parameter des Fahrzustands

Relevante Parameter des Fahrzustands sind Fahrgeschwindigkeit, Lenkwinkel und ggf. die Aktivierung von Brems- oder Anfahrassistentensystemen. Die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs ist proportional zur Raddrehzahl unter der Annahme, dass das Rad ohne Schlupf abrollt. Daraus folgt, dass mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit die Abwurfgeschwindigkeit steigt (Gleichung 2.4). Mit der Zunahme der Abwurfgeschwindigkeit ist einerseits eine Steigerung auch bei der

maximalen Höhe der Flugbahn der abgeworfenen Steine anzunehmen und andererseits eine erhöhte Schädigung der Aufprallfläche aufgrund des höheren Energieeintrags. Bei dem Vergleich der Schädigung (Schichtverlust) bei 50 km/h und 80 km/h wurde bereits eine Zunahme des Schichtverlustes (Kohäsionsbruch) von Durchmessern bis zu 1500 μm nachgewiesen [10]. Des Weiteren wurde in [10] nachgewiesen, dass bei steigenden Fahrgeschwindigkeiten der maximale Winkel, bei dem Steine vom Reifen mitgenommen und wieder abgeworfen werden, abnimmt. Die Anzahl der abgeworfenen Steine nimmt hierbei jedoch zu. Erkenntnisse über den Einfluss des Lenkwinkels sind noch wenig bekannt. Es ist jedoch zu erwarten, dass bei Zunahme des Lenkwinkels in einer Kurvenfahrt vor allem niedrig gelegene Bereiche von Steinschlag betroffen sind [10]. Assistenz- bzw. Sicherheitssysteme im Fahrzeug unterstützen den Fahrer bei der Kontrolle in Grenzsituationen. Hierbei kann die Annahme getroffen werden, dass solche Systeme, die aktiv die Drehbewegung des Rades regeln, den Steinabwurf beeinflussen. Zu diesen Systemen zählen das Antiblockiersystem und die elektronische Stabilitätskontrolle (ESC bzw. ESP). Bei dem Antiblockiersystem wird bei einer Bremsung verhindert, dass die Räder blockieren. Hierdurch können weiterhin die Seitenführungskräfte am Reifen übertragen werden, so dass Lenkeingriffe des Fahrers möglich sind. Die elektronische Stabilitätskontrolle unterstützt den Fahrer im Kurvengrenzbereich und beinhaltet meist auch eine automatische Schlupfregelung (ASR) zur Regelung des Antriebsmoments beim Anfahren [18]. Zu diesen Systemen wurde bereits Versuche durchgeführt, jedoch lassen sich aufgrund von Ergebnisschwankungen keine Schlussfolgerungen über den Einfluss auf den Steinabwurf ziehen [30]. In der vorliegenden Arbeit wurden in diesem Zusammenhang sowie aufgrund der Hinweise der Automobilhersteller, diese im normalen Fahrbetrieb auch nicht deaktiviert. Alle Versuche wurden mit aktivierten Assistenzsystemen durchgeführt.

2.4.3 Einflussfaktor Fahrbahn

Das Fahrzeug überträgt durch die Reifen die Kraft direkt auf die Fahrbahn und auf die darauf befindlichen Projektile. Projektile stellen alle Körper dar, die lose auf der Straße liegen und von den Rädern abgeworfen werden. Bei den Projektilen handelt es sich an dieser Stelle zumeist um Steine, welche durch unterschiedlichste Ursachen auf die Fahrbahn geraten sind. Insbesondere in den Wintermonaten gelangen durch den Winterdienst viele Projektile durch Streumittel auf die Fahrbahn. Hier wird zwischen

auftauenden und abstumpfenden Streumitteln unterschieden [31]. Natriumchlorid wird als auftauendes Streumittel verwendet, welches nass ausgebracht wird. Bei der Verwendung von auftauenden Streumitteln gilt der Grundsatz für die Ausbringenden „so wenig Salz wie möglich, so viel Salz wie nötig“ [31]. Mit auftauenden Streumitteln wird vor allem die Verkehrssicherheit an Kreuzungen und anderen gefährlichen Stellen sichergestellt [32]. Hier werden teilweise noch zusätzliche abstumpfende Streumittel ausgebracht, welche aus Sand, Kies-, Basalt-, Moränensplitt oder Granulate bestehen können [32]. Diese Projektile verzahnen sich mit dem Reifen und verbessern dadurch den Kraftschluss auf schneebedeckten Fahrbahnen. Hierbei ist eine ausreichende Menge an abstumpfenden Partikel notwendig, wobei unter diesen Bedingungen die ausgebrachte Menge der abstumpfenden Partikel die Menge der auftauenden Mittel um das zehnfache bis fünfzehnfache übersteigt [32]. Erfahrungen über den Einfluss auf den Steinabwurf der unterschiedlichen abstumpfenden Streumittel sind nicht vorhanden. Jedoch ist ein deutlicher Einfluss aus der Menge, Oberfläche und Größe der Projektile zu erwarten. Neben dem Aufbringen von Streumittel im Winter wird in den Sommermonaten Rollsplitt ausgebracht, um die Rauheit der Straßenbeläge zu erhalten. Die ausgebrachte Menge variiert in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten. Zudem können von Bau- und Landwirtschaftsfahrzeugen durch herabfallende Steine von der Ladefläche unbeabsichtigt Steine oder Splitt auf der Straße verteilt werden. Einen weiteren Einfluss stellen die Ränder der Fahrbahnen dar. Diese bestehen meist aus einer Schotterschicht. Verlässt der Reifen eines Fahrzeugs die Fahrbahn, werden Steine zum einen gegen das Fahrzeug geworfen und zum anderen zusätzlich Steine auf der Fahrbahn verteilt.

2.4.4 Auftreffwinkel

Die Einflussgröße des Auftreffwinkels wurde in [33] bereits in mehreren Versuchen genauer ermittelt. Hierbei wurde festgestellt, dass die Beschädigung an der Oberfläche mit zunehmendem Auftreffwinkel der Steine größer wurde. Dies ist auf den höheren Energieeintrag bei größerem Auftreffwinkel zurückzuführen.

2.4.5 Umgebungsbedingungen

Die Umgebungstemperatur sowie feuchte Straßenbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Steinmitnahme. In [34] wurde bereits ein Versuch durchgeführt, der den Einfluss der Temperatur deutlich machen sollte. Hierbei wurden

Reifen auf eine Temperatur von ca. 50°C erwärmt. Die Außentemperatur war mit 17°C bei diesem Versuch jedoch niedrig, so dass sich der Reifen auf 28°C abkühlte. Der Einfluss konnte dennoch deutlich gemacht werden, da bei einer Reifentemperatur von 28°C eine niedrigere Steinschlagbeanspruchung festgestellt wurde als bei einer Temperatur von ca. 15°C. „Eine Erklärung für die niedrige Steinschlagbeanspruchung bei höheren Temperaturen ist, dass durch den weicheren Gummi bei höheren Temperaturen mehr Steine im Profil des Reifens eingeklemmt werden und somit nicht sofort wieder abgeworfen werden.“ [13] Den Einfluss der Feuchte wurde in [10] untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass feuchte Straßenbedingungen eine erhöhte Mitnahme von kleinen Steinen begünstigt, die zudem lange Haftzeiten aufweisen [10].

2.5 Theorien zum Steinaufprall und dadurch induzierte Lackschädigung

Die Theorien in diesem Abschnitt befassen sich mit Steinaufprall bzw. -schlag und der induzierten Beschädigung der Oberfläche. Hierbei wird auf den Lackaufbau unterschiedlicher Substrate wie Stahl, Aluminium und Kunststoff eingegangen und die Belastungsverhältnisse im Schichtsystem beim Stoßvorgang im darauffolgenden Abschnitt erläutert. Der Schädigungsvorgang bei einer Stoßbelastung sowie die kinetische Energie und Schädigung beim Aufprall eines abgeworfenen Steines werden abschließend in den letzten beiden Abschnitten erklärt.

2.5.1 Lackaufbau unterschiedlicher Substrate

Der Lackaufbau unterscheidet sich abhängig vom metallischen Grundwerkstoff (Abb. 2.14). Der Grund hierfür ist das unterschiedliche Korrosionsverhalten der Werkstoffe. So entstehen auf Stahl Oxidschichten, welche porös sind und für Wasser und Sauerstoff durchlässig sind und daher keinen Schutz gegen atmosphärische Umwelteinflüsse darstellen. Zink und Aluminium hingegen bilden bei mittleren pH-Werten stabile und geschlossene Schutzschichten aus [35].

Klarlack	ca. 40 µm	Klarlack	ca. 40 µm		
Uni-Basislack	ca. 25 µm	Uni-Basislack	ca. 25 µm		
Effekt-Basislack	ca. 15 µm	Effekt-Basislack	ca. 15 µm	Klarlack	ca. 40 µm
Füller	ca. 35 µm	Füller	ca. 35 µm	Uni-Basislack	ca. 25 µm
KTL-Schicht	ca. 20 µm	KTL-Schicht	ca. 20 µm	Effekt-Basislack	ca. 15 µm
Zink-Schicht	ca. 7,5 µm			Primer	ca. 15 µm
Stahlsubstrat (vorbehandelt)		Aluminiumsubstrat (vorbehandelt)		PP-Substrat (vorbehandelt)	

Abbildung 2.14: Schematischer Beschichtungsaufbau auf Stahl-, Aluminium- und PP-EPDM-Substrat nach [10, 35]

Außenhautbleche aus Stahl werden aus diesem Grund elektrolytisch verzinkt, bevor der eigentliche Lackierprozess beginnt. Bei einer Verletzung der Zink-Schicht entsteht so ein kathodischer Schutz, indem sich die Zink-Schicht nach und nach auflöst und der Stahl geschützt wird [35]. Nach dem Reinigen und Entfetten der Karosserie werden im Rahmen der Vorbehandlung die Unterwanderungsbeständigkeit und die Haftungsgüte durch den Einbau von Konversionsüberzügen verbessert [36]. Unabhängig vom jeweiligen metallischen Werkstoff erhöht das Phosphatierungsverfahren die Haftungsgüte. Einerseits hat die Polarität des Schichtmaterials dadurch weniger Einfluss auf die Haftung, andererseits entsteht durch die Phosphatierung ein Kristallgefüge, in das sich die darauffolgende kathodische Lackierung mechanisch verklammern kann [37].

Die kathodische Tauchlackierung (KTL) bietet den wichtigsten Korrosionsschutz der Karosserie. Diese wird dabei vollständig in ein Bad mit einer Lack-Elektrolyt-Lösung getaucht und anschließend eine elektrische Spannung induziert [36]. An der negativ geladenen Karosserie lagern sich anschließend durch die Feldkräfte die positiv geladenen Lackpartikel an (Kataphorese) [36]. Mit Hilfe der Kataphorese werden folglich alle Außenflächen, Innenflächen und Hohlräume mit einer gleichmäßigen Schichtdicke von 20 µm vollständig beschichtet. Im Anschluss an die KTL wird eine Füllerschicht auf die Karosserieaußenseite aufgetragen. Zu den Hauptaufgaben des Füllers zählen, das Ausgleichen möglicher Unebenheiten und der Steinschlagschutz [14, 25].

Der Füller wird zudem innerhalb der Grundfarbtöne an die Farbe der nachfolgenden Uni- bzw. Effektlackierung des Fahrzeugs anpasst, um die Deckkraft zu erhöhen und die visuelle Erkennbarkeit möglicher Lackeinschläge zu reduzieren. Durch die weichen Eigenschaften dient der Füller bei einer Schädigung auch als Sollbruchstelle, um die darunterliegende KTL-Schicht geschlossen zu halten [38]. Auf die Füllerschicht wird nachfolgend der Basis- bzw. Effektlack aufgetragen. Der Effektlack sorgt für die Farbgebung der Karosserie und dient gleichzeitig als weiterer UV-Schutz für die KTL [14, 25]. Als abschließende Schicht wird der Klarlack appliziert. Dieser sorgt für die Chemikalien-, Kratz- und Wetterbeständigkeit des Lacksystems und ist maßgebend für das ästhetische Erscheinungsbild des Fahrzeugs [14].

2.5.2 Belastungsverhältnisse im Schichtsystem beim Stoßvorgang

Bei einer Stoßbelastung stehen mehrere Ansätze zur Ermittlung des Schichtverhaltens zur Verfügung. Von Zorll wurde, in „Untergrundeinflüsse auf das Verhalten von Korrosionsschutzbeschichtungen bei stoßartiger Belastung“, hierfür eine Theorie erstellt, die weitestgehend auf den mathematischen Formulierungen von Timoschenko (Elastizitätstheorie) basiert [37]. Hierbei wird angenommen, dass Lackschicht und Substrat in der Grenzfläche als eine Einheit anzusehen sind. Die Spannungskomponenten werden über die Grenzfläche hinweg stetig übertragen. Durch Untersuchungen von Breinsberger und Koppelman wurde diese Hypothese belegt [37, 39].

Es wurde festgestellt, dass sich organisch-polymere Stoffe bei schlagartiger Beanspruchung erheblich härter verhalten als bei einer langsam erfolgenden Belastung [39]. Die auftretenden Spannungen bei einer punktförmigen Impulsbelastung auf eine Beschichtung sind in Abbildung 2.15 schematisch dargestellt. Hierbei existieren in der Lackschicht radiale (σ_r) und tangential (σ_φ) Normalspannungen, die für die Bildung von stern- und kreisförmigen Rissen verantwortlich sind [37]. Sobald die maximal mögliche Zug- / Druckspannung der Beschichtung überschritten wird, tritt dieser Fall der Rissbildung ein. Maßgebend für eine Ablösung zwischen Substrat und Film sind die interlaminaeren Spannungen (Kompressionsspannung σ_z und Scherspannung τ_r) [37].

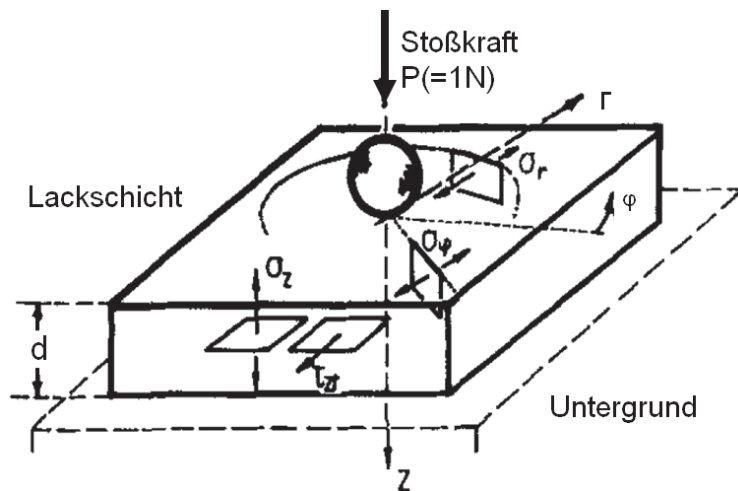


Abbildung 2.15: Auftretende Spannungen bei einer Impulsbelastung von Beschichtungen [37]

Da die Schädigungsfläche unmittelbar mit der Abplatzgröße des Films beziehungsweise mit den Spannungsbedingungen im Beschichtungsaufbau zusammenhängt, werden diese nachstehend genauer betrachtet. Das Diagramm in Abbildung 2.16 zeigt die Kompressions- und Scherspannung für unterschiedliche Filmdicken in Abhängigkeit zum Abstand r der Stoßachse. Für die nach Timoschenko errechneten Spannungsverläufe in der Grenzschicht, ist die Stoßkraft P auf 1 N normiert [37]. Die Scher- und Kompressionsspannungen für unterschiedliche Filmdicken besitzen hier ein ähnliches Verhalten. Je größer die Filmdicke d , desto geringer sind die Spannungsmaxima im Beschichtungsaufbau. Dies deckt sich mit den praktischen Erfahrungen von Zorll. Durch die Erhöhung der Schichtdicke wurde eine verbesserte Steinschlagresistenz festgestellt [33, 37].

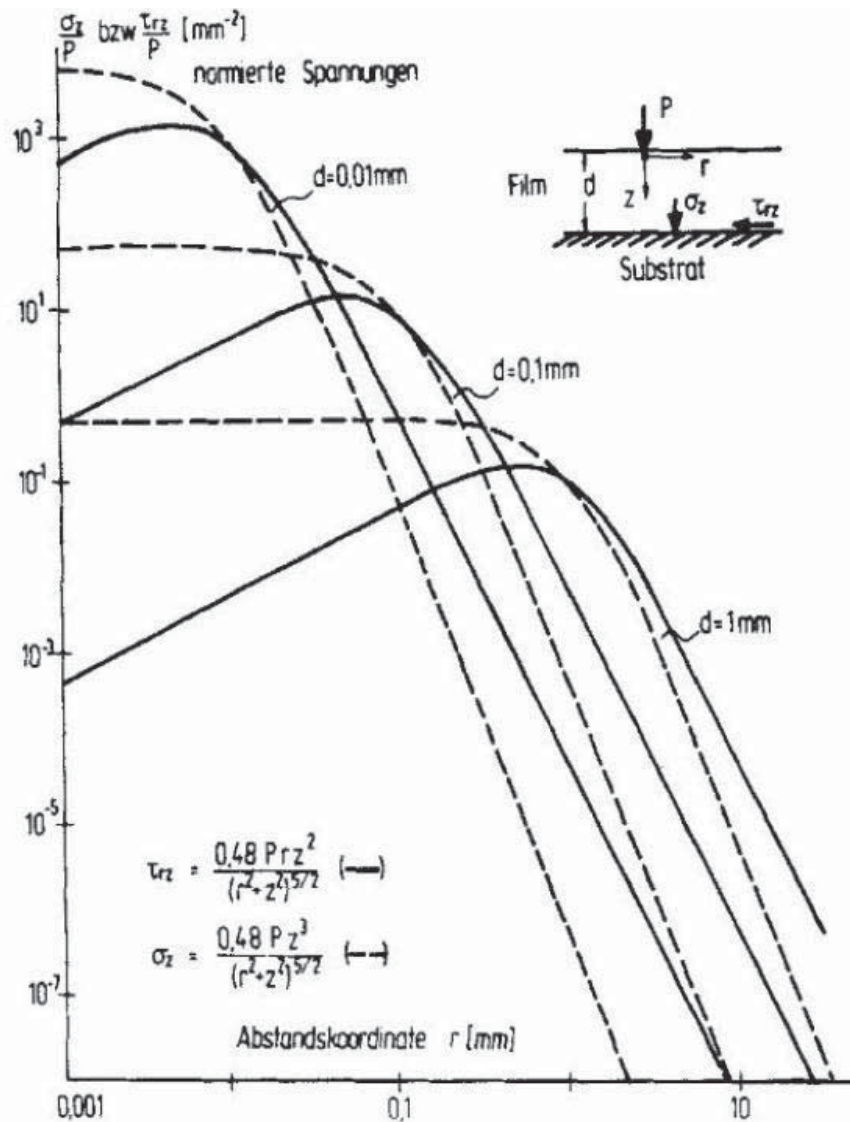


Abbildung 2.16: Normierte Kompressions- und Scherspannung für unterschiedliche Filmdicken in Abhängigkeit zur Stoßachse [37]

Die Scherspannungen (Volllinien in Abbildung 2.16) werden bei der qualitativen Betrachtung in der Stoßachse aus Symmetriegründen Null. Des Weiteren steigen diese mit zunehmenden Abstand r deutlich bis zu einem Maximum an und fallen anschließend wieder schnell ab. Die Lage des Maximums ist hierbei von der Schichtdicke abhängig [37]. Wird die Schubfestigkeit in der Beschichtung durch die Impulsbelastung überschritten, ist folglich mit einem Abplatzen der Filmschicht zu rechnen.

Die Kompressionsspannung (gestrichelte Linie in Abbildung 2.16) wirkt hingegen haftfestigkeitsfördernd. Hierbei werden Film und Substrat aufeinandergespreßt [37]. Nur in unmittelbarer Umgebung zur Stoßachse ist diese positive Wirkung aber festzustellen. Mit zunehmendem Abstand fällt die Kompressionsspannung rasch ab.

Der Wirkungsbereich der Kompressionsspannung ist vor allem von der Projektilform abhängig. Sphärische Projektile (Kugel) haben beispielsweise eine homogenere Kontaktfläche als dodekadische Körper. Bei diesen kann im Extremfall die Kontaktfläche ein einzelner Eckpunkt sein. Zusammengefasst führen die Kompressionsspannung im Stoßzentrum zu einem Kohäsionsversagen in der Beschichtung und die Scherspannung im umliegenden Bereich zu einem Adhäsionsversagen in der Grenzschicht [37].

2.5.3 Schädigungsvorgang bei einer Stoßbelastung

Ein Stoß auf einen Körper kann elastisch, plastisch oder teilelastisch erfolgen [40]. Beim Aufprall eines Steins auf eine Lackoberfläche handelt es sich meistens um einen teilelastischen Stoß [10]. Eine Aussage über die Elastizität eines Stoßes beschreibt der Restitutionskoeffizient. Dieser Koeffizient kann Werte zwischen 0 (vollkommen plastischer Stoß) und 1 (vollkommen elastischer Stoß) annehmen [40]. Bei einem teilelastischen Stoß wird Energie dissipiert und im Beschichtungsaufbau kommt es zu einer plastischen Verformung an der Oberfläche.

Zur Verdeutlichung der Vorgänge bei einer Stoßbelastung werden diese an einem Mehrschicht-Lackaufbau vereinfacht dargestellt. Die Ausgangssituation vor dem Aufprall stellt die Abbildung 2.17 dar. Hierbei ist die Decklackschicht linear elastisch verformbar. Der darunterliegende Füller ist viskoelastisch und plastisch verformbar und dient somit zur Absorption der Stoßenergie [33].

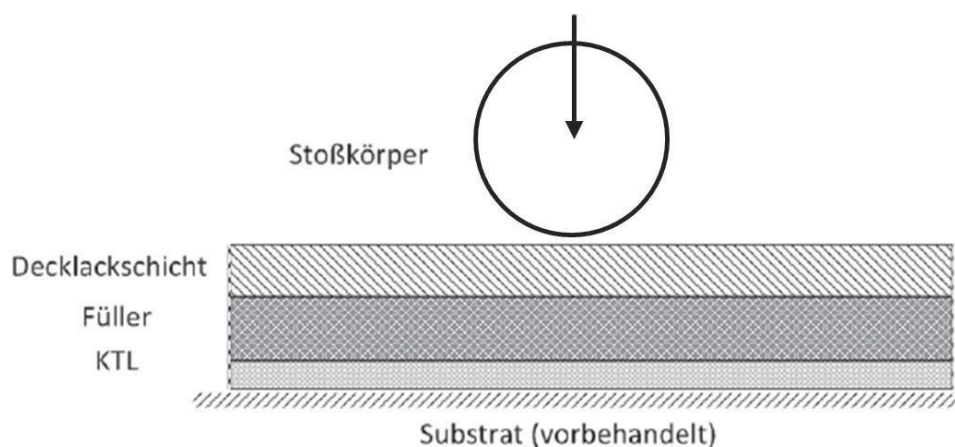


Abbildung 2.17: Phase 1 des Schädigungsvorgangs eines Mehrschicht Lackaufbaus nach [33]

Abbildung 2.18 bildet den Stoßvorgang mit einem sphärischen Stoßkörper ab. Dabei wird die Decklackschicht elastisch durchbogen und dissipiert durch die Deformationsarbeit die Stoßenergie. Der Füller dissipiert durch die plastische Verformung weitere Stoßenergie [33].

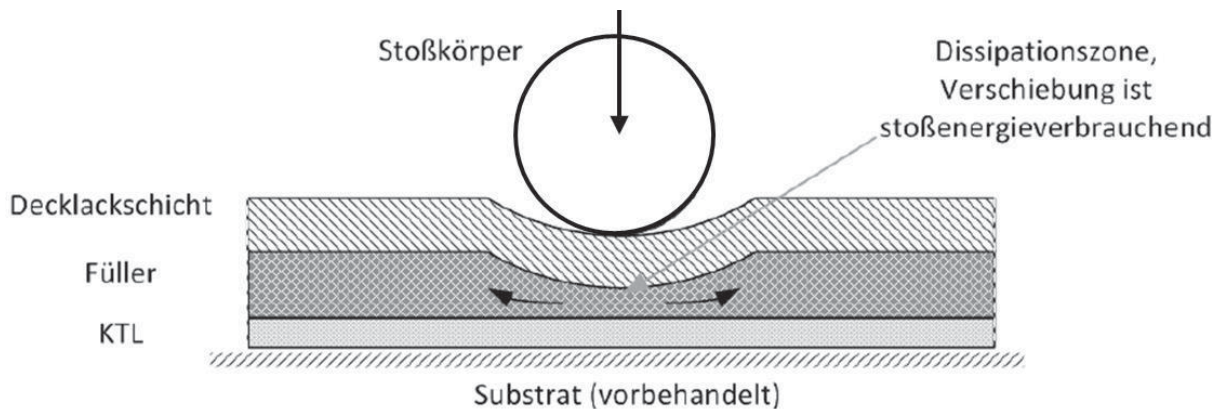


Abbildung 2.18: Phase 2 des Schädigungsvorgangs eines Multischicht Lackaufbaus nach [33]

Die Abbildung 2.19 stellt den Endzustand des Stoßvorgangs dar. Es ist zu erkennen, dass sich der Füller partiell vom Substrat abgelöst hat. Die Decklackschicht ist teilweise zurückgefedert und ringförmig aufgewölbt [33].

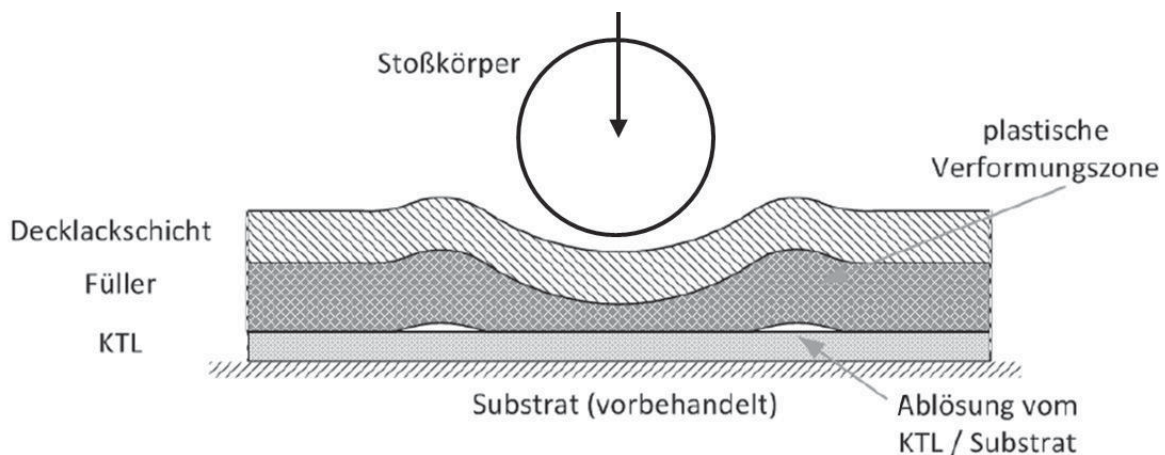


Abbildung 2.19: Phase 2 des Schädigungsvorgangs eines Multischicht Lackaufbaus nach [33]

Der Stoßvorgang beschreibt somit das Schädigungsverhalten bei einer Impulsbelastung mit einem sphärischen Projektil. Aus den theoretischen Betrachtungen nach Zorll ist bekannt [37], dass die Scherspannung in einem gewissen Abstand zur Stoßachse ein Maximum durchläuft. Dieses Extremum entspricht der in

Abbildung 2.19 erkennbaren Ablösezone (Ablösung von KTL und Substrat). Des Weiteren ist auch die Auswirkung der Kompressionsspannung im Umfeld der Stoßachse durch die plastisch verformte Füllerschicht sowie die noch intakte Grenzflächenhaftung erkennbar.

2.5.4 Kinetische Energie und Schädigung beim Steinaufprall

Die Schädigung der Oberfläche ist durch Energie, Auftreffwinkel und -häufigkeit der Projektile parametrisiert. Die freigesetzte Energie auf die Versuchsproben wird durch den Zusammenhang der Gleichung 2.15 beschrieben. Die notwendige Aufprallgeschwindigkeit $v(t)$ wird aus den Kapiteln 2.3.2 (Gleichung 2.12) übernommen.

$$E_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v(t)^2 \quad (2.15)$$

2.5.5 Durchschlagverhalten von Projektilen auf einen Panzer

Im militärischen Bereich wird das Durchschlagverhalten von Projektilen bzw. Geschossen auf Panzer mit der sogenannten Panzerformel beschrieben [42]. Das Durchschlagverhalten bzw. die Eindringtiefe hängt hierbei vor allem von der kinetischen Energie ab, mit der das Projektil auftrifft. Aber auch der Durchmesser, konstruktive Aufbau sowie der Auftreffwinkel spielen hierbei neben der Materialeigenschaft des getroffenen Substrats eine wesentliche Rolle.

Der Durchdringungsvorgang wird im Rheinmetall Waffentechnischen Handbuch wie folgt beschrieben [42]: „Der eigentliche Durchdringungsvorgang kann auf verschiedenen Weisen erfolgen: Durch *Drücken* entsteht ein Bruch der Platte unter Ribbildung infolge zu großer Dehnung. Durch *Dornen* wird das Material durch die Geschößspitze zum seitlichen Ausweichen gezwungen. [...] Durch *Stanzen* drückt das Geschöß einen kalibergroßen Pfropfen aus der Platte heraus. [...] Der wirkliche Durchdringungsvorgang ist meist eine Kombination der Einzelvorgänge [...]“ [42]

In der Praxis hat sich die *Panzerformel* (Gleichung 2.16) von *de Marre* bewährt, um die Durchdringungstiefe eines Projektils zu berechnen.

$$S_b^{0,7} = \frac{m^{0,5} \cdot v}{A \cdot d^{0,75}} \quad (2.16)$$

Hierbei bedeuten S_b die maximale Eindringtiefe [dm] eines Geschosses in den Panzer, m die Masse des Geschosses [kg], v seine Aufprallgeschwindigkeit [m/s] und d das Geschosskaliber [dm]. A ist ein empirischer Faktor, der von der Eigenschaft des Panzerwerkstoffs abhängt [42].

Diese Formel besagt im Wesentlichen [46]:

1. Bei einer Erhöhung der Aufprallgeschwindigkeit v um 10% vergrößert sich S_b um 14%. Aber bei einer Verdoppelung der Aufprallgeschwindigkeit nimmt die Eindringtiefe um das Zweieinhalbfache zu.
2. Die Eindringtiefe wird größer, wenn das Gewicht des Projektils erhöht wird.
3. Das Produkt aus Geschwindigkeit zum Quadrat und der halben Masse ergibt die kinetische Energie, von der die Eindringtiefe abhängt.

Die Eindringtiefe S_b wird mit der Gleichung 2.16 berechnet. Hierbei wird vorausgesetzt, dass das Projektil senkrecht auf eine Panzerung auftrifft. Bei einer Abweichung der Schussrichtung zum Auftreffwinkel α , nimmt der Panzerdurchschlag ab. Die Eindringtiefe S_b wird mit dem Faktor $\cos^n \alpha$ (mit $n > 1$) geringer. Aus diesem Grund wird eine weitere Gleichung 2.17 benötigt, welche den Auftreffwinkel berücksichtigt. [42,46]:

$$S_a = S_b \cdot \cos^n \alpha \quad (2.17)$$

Im Anwendungsbereich der Panzerformel kann mit $n = 1,5$ weitgehende Übereinstimmung mit realen Verhältnissen erreicht werden [42].

2.6 Numerische Simulation der Steinschlagschädigung

Bestimmte Bereiche des Fahrzeugs sind im Fahrbetrieb einer mehr oder weniger starken Belastung durch Steinschlag ausgesetzt. Nach Sydow wird ein Fahrzeug in verschiedene Schädigungszonen eingeteilt (Abbildung 2.20) [43].

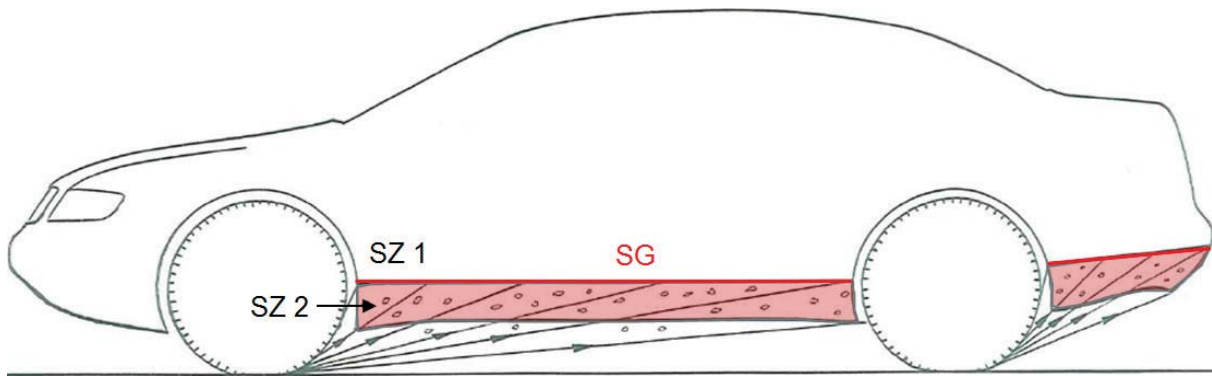


Abbildung 2.20: Einteilung des Fahrzeugs in Steinschlagzonen: SZ 1 $z > 400$ mm (weiße Fläche) und SZ 2 bis $z \leq 400$ mm (rote Fläche). SG ist die Steinschlaggrenze am Fahrzeug (rote Linie) [15].

In der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Steinschlagzone 2, da hier das größte Schädigungspotential durch den vom vorderen Fahrzeugreifen verursachten Steinschlag besteht. Die Schädigung in dieser Zone wird in der frühen Konzeptphase in der Fahrzeugentwicklung mit Hilfe der Steinschlagsimulation „Pebbles II“ untersucht.

Pebbles II ist eine Simulationsanwendung innerhalb der CATIA V5-Umgebung. CATIA selbst ist eine CAD-Software, [45] mit deren Hilfe Fahrzeuge ausgelegt und konstruiert werden. Mit dieser Simulationssoftware kann der vom Reifen ausgehende Steinschlag auf die Fahrzeugkontur bewertet werden, um dadurch erste Erkenntnisse zum Schädigungsmaß zu gewinnen. Als Abwurfpunkt wird der Radaufstandspunkt verwendet, die Flugbahn der Steine wird hierbei zur Vereinfachung als linear angenommen. Die Projektile (Steine) haben eine definierbare Masse, deren Geometrie für die Simulation unberücksichtigt bleibt. Eine weitere Vereinfachung in der Simulation ist die Berechnung ohne Reifenschlupf [44].

Die Analyse der Steinschlagschädigung erfolgt anhand von Auftreffwinkel und Auftreffhäufigkeit. Aus diesen Größen werden die Kriterien des Normalimpulses und der Energiedichte abgeleitet, welche bei Audi für die Beurteilung der Fahrwerks- und Unterbodenschädigung herangezogen werden [45]. Für die Karosserieanalyse, d.h. die Untersuchung von Schwellern und Seitenwandrahmen, wird mit den Auftreffwinkeln gerechnet. Diese ergeben sich jeweils aus dem Winkel zwischen der Flugbahn und der Tangentialebene am Auftreffpunkt [30]. Für mögliche Auftreffpunkte sind verschiedene Abwurfpunkte zu betrachten, welche gleichmäßig über die

Reifenbreite verteilt sind. Von den möglichen Abwurfpunkten ausgehend wird die Flugbahn mit dem größten Auftreffwinkel gewählt, wobei sich die Analyse auf jene Flugbahnen beschränkt, welche nicht von anderen Flächen abgeschirmt werden (beispielsweise Radhaus) [45].

Die Berechnung der Auftreffhäufigkeit erfolgt anhand eines vorgegebenen Abwurfprofils, das mit Hilfe eines praktischen Versuchs in [45, S. 28] ermittelt wurde. Diese Häufigkeit ist durch die Anzahl an Treffern pro Zeit und Auftrefffläche definiert. Aus den Parametern der Auftreffhäufigkeit errechnet Pebbles II den Normalimpuls und die Energiedichte, welche ebenfalls zu den Bewertungskriterien der Schädigung zählen [45]. Die Ergebnisse aus der Simulation werden parallel zur numerischen Darstellung in Form einer Grafik ausgegeben. Für die Darstellung der Auftreffwinkel ist es üblich, das Fahrzeug zur Lokalisierung der Schädigung mit Hilfe von Gitternetzlinien in Parzellen einzuteilen. Die Verteilung der Auftreffwinkel über die Fahrzeuglänge kann separat ausgegeben werden. Für die Visualisierung werden den Auftreffwinkeln Farben zugeordnet, die das unterschiedliche Schädigungspotential widerspiegeln.

3 Gegenstand der Arbeit

Die Steinschlagsimulation beschäftigt sich mit dem vom Reifen ausgehenden Eigenbewurf durch Steine an Karosserie und Fahrwerk. Gegenwärtig läuft die Steinschlagbewertung rein geometrisch über die Ermittlung der Auftreffwinkel im Simulationstool „Pebbles II“. Die derzeit verfügbaren Methoden zur Simulation erlauben jedoch keine Vorhersagen zur Schädigung von Oberflächen durch Steinschlag. Daher werden derzeit zur Validierung der Simulationsergebnisse die Fahrzeuge einer 200 km langen Splitterprobung unterzogen, um im Nachgang die Schädigung der betroffenen Bauteile, wie Schweller, Türen und Seitenwandrahmen bestimmen zu können.

Das Ziel dieser Dissertation ist es, die Aussagequalität der Steinschlagsimulation im Hinblick auf die zu erwartende Oberflächenschädigung zu verbessern. Die Entwicklung eines Schädigungsmodells in der Steinschlagsimulation erfolgt in drei Teilschritten: 1) Analyse des Abwurfvorgangs, 2) Analyse der Oberflächenschädigung

bei verschiedenen Auftreffwinkeln und 3) Weiterentwicklung des Steinschlag-simulationsmodells (Abbildung 1.3, Kapitel 1.2).

Anhand von praktischen Versuchen wurden zum einen Abwurfprofile von Steinen mittels High-Speed-Kamera-Aufnahmen an einem Versuchsfahrzeug ermittelt. Dabei wurden die vielen Einflussgrößen (Anhang 9.1) auf die wesentlichen Parameter reduziert. Zum anderen wurden mit Hilfe eines eigens entwickelten Prüfstandes, einem 15 m hohen Fallturm, unter definierten Laborbedingungen Messdaten zusammengetragen, auf deren Basis ein Modell für die Oberflächenschädigung der Lackschicht auf Proben mit vollständigem Lackaufbau analog der Karosserieaußenhaut eines Fahrzeuges erstellt werden konnte. Die Ergebnisse aus den praktischen Versuchen wurden anschließend in das Simulationsprogramm eingearbeitet. Mit Hilfe eines Entwicklungsstandards wird die Auslegung der Karosserie bezüglich ihrer Robustheit gegenüber Steinschlägen beschrieben. Zugleich wird durch die Minimierung des Erprobungsaufwandes der Entwicklungsprozess beschleunigt. Kostenintensive Maßnahmen, wie zum Beispiel das nachträgliche Aufbringen von Steinschlagschutzfolien, können dadurch in Zukunft über die Strak-Optimierung frühzeitig vermieden werden.

Mit der Thematik des Steinschlags ausgehend vom eigenen Reifen bis zum Aufprall auf die Karosserieoberfläche, haben sich in der Vergangenheit bereits einige Automobilhersteller beschäftigt. Durch aufwendige Versuchsaufbauten wurden in den vorangegangenen Arbeiten bereits Theorien zum Abwurfmechanismus aufgestellt und die Steinschlagschädigung in verschiedenen Korrosionstests untersucht.

Eine Reihe wichtiger Fragestellungen wie z.B.

1. die Betrachtung der unterschiedlichen Fahrmanöver in Bezug auf den Abwurfvorgang des einzelnen Steins, ausgehend vom angetriebenen Reifen,
2. die Momentaufnahme der Entstehung der Schädigung beim Einschlag und
3. die detaillierte Nachbildung der Oberflächenschädigung abhängig von Parametern wie Auftreffwinkel, Energien, Formfaktoren usw.

wurde dabei jedoch noch nicht untersucht. Diese stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit.

4 Experimente

In diesem Kapitel werden der Versuchsaufbau, das für die Versuche genutzte Equipment und die Versuchsdurchführung beschrieben. Das Thema Steinabwurf, die Thematik der Oberflächenschädigung und die Steinschlagsimulation werden hierbei in separaten Abschnitten behandelt.

4.1 Analyse des Steinabwurfs im Fahrbetrieb

Um den Abwurf der Steine vom Reifen zu untersuchen, wurden unter definierten Bedingungen Versuchsfahrten bei unterschiedlichen Fahrmanövern durchgeführt. Mithilfe einer High-Speed-Kamera wurden die Flugbahnen abgeworfener Steine dargestellt und ausgewertet. Die Versuche wurden mit einem umgebauten Audi Q5 (Anhang 9.2) im Audi Prüfgelände Neustadt (PGN) durchgeführt (Anhang 9.3).

4.1.1 Versuchsaufbau

Zur detaillierten Analyse des Steinabwurfs, ausgehend vom angetriebenen Reifen, dienten zwei Versuchsaufbauten (Tabelle 4.1). Der Versuchsaufbau mit einem ortsfesten Kamerasystem ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Hier werden die Flugbahnen der einzelnen Steine ausgehend vom Reifen bis zum Aufprall auf die Karosserieoberfläche dargestellt. Im zweiten Versuchsaufbau wird ein fahrzeugfestes Kamerasystem genutzt, welches den Steinabwurf des Reifens im fahrzeugfesten Bezugssystem abbildet (Abbildung 4.2).

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Versuchsaufbauten zum Steinabwurf

Untersuchte Parameter	Versuchsaufbau	
	Ortsfest	Fahrzeugfest
Fahrzustand (kontante Fahrt, Beschleunigung, Verzögerung)	x	x
Fahrgeschwindigkeit	x	
Steinflugbahn (max. z-Höhe), -geschwindigkeiten	x	
Abwurfwinkel	x	
Ablösemechanismus		x
Reifenschlupf	x	
Einfluss Lenkeinschlag (Lenkwinkel)		x
Aufprall der Steine am Fahrzeug	x	
Steingröße	x	

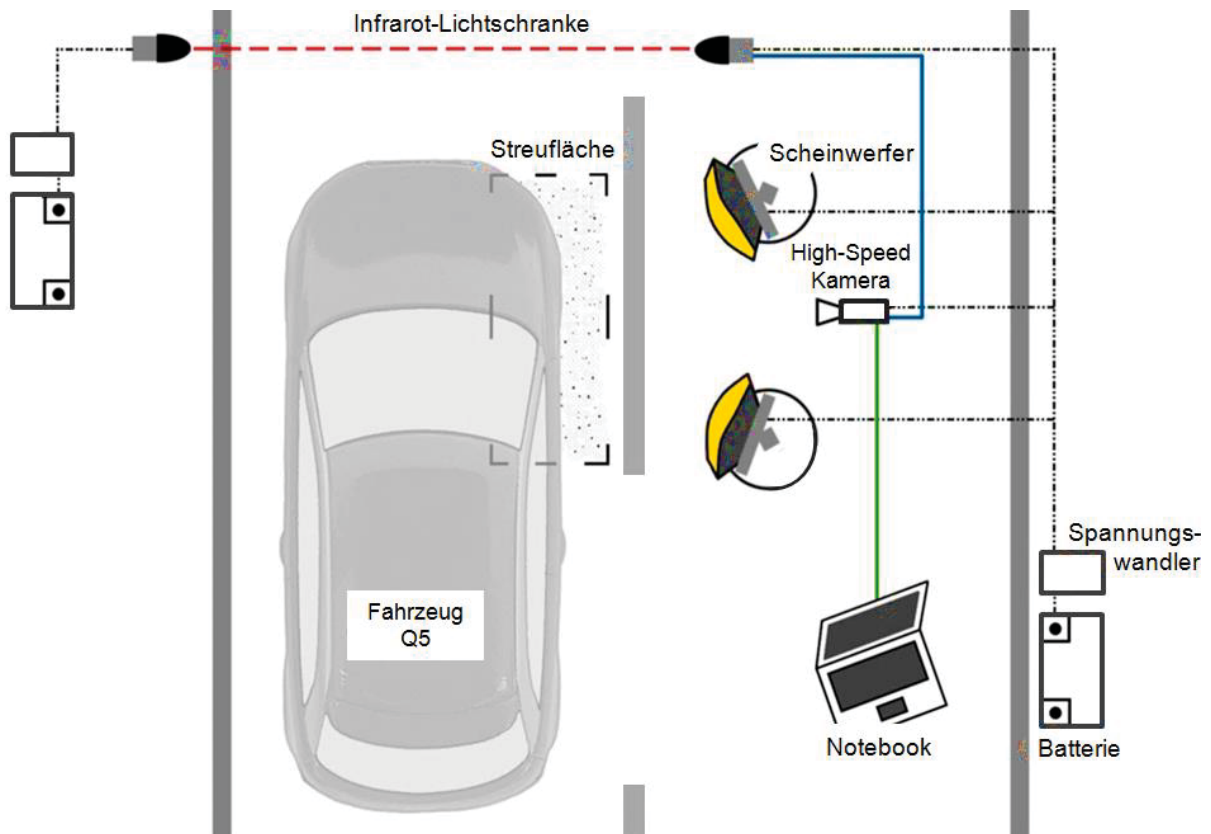


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des ortsfesten Versuchsaufbaus: Triggersignal (blaue Linie), Videosignal (grüne Linie), Spannungsversorgung (schwarze gestrichelte Linie)



Abbildung 4.2: Versuchsaufbau des fahrzeugfesten Kamerasystems zur Analyse des Abwurfmechanismus von Steinen.

4.1.1.1 Ortsfester Versuchsaufbau

Bei dem ortsfesten Versuchsaufbau wurde auf einer definierten Streufläche von 1 m² (0,60 m x 1,67 m) einer asphaltierten Fahrbahn eine Splittmenge von 500 g/m² gleichmäßig aufgebracht und verteilt. Im Abstand von 2 m zur Streufläche war eine High-Speed-Kamera orthogonal zur Fahrtrichtung positioniert. Die High-Speed-Kamera der Firma AOS Technologies (Anhang 9.14) hatte eine Bildrate von 2500 Bildern pro Sekunde (fps). Für die Untersuchung der Steinflugbahnen wurde zur Erhöhung der Auflösung auf 600 Pixel x 491 Pixel (Breite x Höhe) eine Bildrate von 2000 fps gewählt. Die High-Speed-Kamera wurde hierbei durch ein Triggersignal einer Infrarot-Lichtschanke der Firma ABUS ausgelöst. Sobald die Lichtschanke unterbrochen wurde, gab diese ein Triggersignal in Form eines elektrischen Signals an die Kamera weiter. Eine homogene und lichtintensive Ausleuchtung war für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen unbedingt notwendig. Diese Ausleuchtung wurde über vier Xenon-Scheinwerfer realisiert, die zum Fahrzeug hin ausgerichtet waren.

Zur Datenaufzeichnung der Fahrzeugzustandsgrößen wurde bei beiden Versuchsreihen (ortsfest und fahrzeugfest) eine Datenlogger-Messverstärker-Kombination der Firma Tellert verwendet. Dieser Datenlogger war im Fahrzeug angebracht und speicherte mittels einer Konfiguration ausgewählte Zustandsgrößen wie Radgeschwindigkeit, Bremsdruck und Lenkradwinkel. Mithilfe eines GPS-Empfängers (Anhang 9.4), wurden die Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs unabhängig vom Untergrund erfasst, was für die Bestimmung des Reifenschlupfes von Bedeutung war (siehe Gleichung 2.15).

Als Versuchsfahrzeug diente ein Audi Q5 2,0 TDI Quattro Modelljahr 2009 (Technische Daten im Anhang 9.6). Der Audi Q5 zählt zu den Geländelimosinen (SUV) und bringt für die Versuchsreihen den Vorteil einer erhöhten Bodenfreiheit mit. Die Unterkante des Schwellers liegt bei ca. 300 mm über der Fahrbahn, somit können die Flugbahnen der Steine, ohne frühzeitig mit dem Fahrzeug zu kollidieren, untersucht werden. Das Fahrzeug war mit einer orange matten Folie beklebt, um den Kontrast zwischen Fahrzeug und Steinen zu erhöhen (Abbildung 4.2). Unterhalb des Versuchsträgers war ein Sichtschutz angebracht, um den Kontrast zwischen den aufgeworfenen Steinen und dem Hintergrund bei Experimenten zu verbessern, wie in der folgenden Abbildung 4.3 gezeigt. Ein aerodynamischer Einfluss durch den Sichtschutz an dieser Position

des Fahrzeuges war nach Einschätzung der Abteilung für Aerodynamik der Audi AG aufgrund von Simulationen mit dem Q5 (Anhang 9.7) vernachlässigbar, da an dieser Position des Unterbodens ein linearer Strömungsverlauf zur Längsachse (x) des Fahrzeugs herrscht.

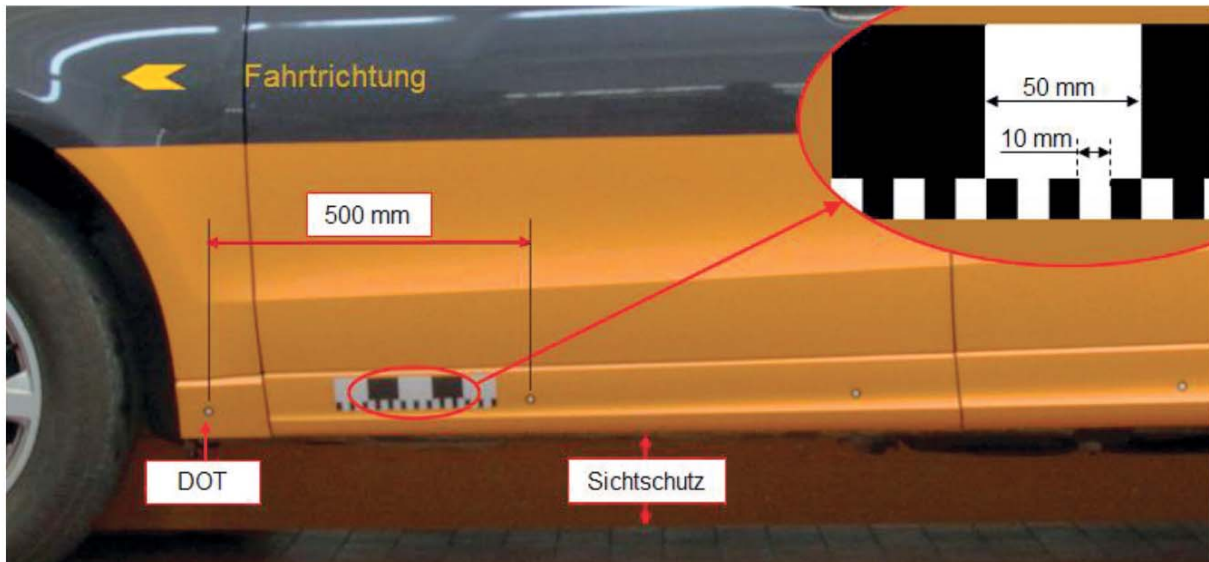


Abbildung 4.3: Versuchsfahrzeug Q5 (gespiegelte Darstellung) mit Sichtschutz, beklebt mit orange matter Folie, zur Verbesserung des Kontrastes zwischen Fahrzeug und Steinen. Als Maßstab und zur Orientierung dienen die Designating Optical Tracker (DOT).

Zur Skalierung war ein Referenzmaßstab mit zwei Maßstäben am Fahrzeug angebracht, welcher aus schwarzen und weißen Feldern mit der Größe von 50 mm und 10 mm besteht. Zusätzlich waren, von Radmittelpunkt der Vorderachse beginnend, alle 500 mm Markierungspunkte, sogenannte Designating Optical Trackers (DOT) für die Auswertung des Videomaterials angebracht. Die Steinverfolgung erfolgte über die Software FalCon eXtra 8.12. Hiermit konnten die Steine einzeln verfolgt, die Koordinaten ihrer Flugbahnen ermittelt und die Geschwindigkeiten berechnet werden. Um neben den Positionskoordinaten der Steine auch zusätzlich die Steingeschwindigkeiten und die daraus folgenden Abwurfwinkel analysieren zu können, wurden die Steingeschwindigkeiten immer an der gleichen Position ($x = 500$ mm) gemessen, um Abweichungen bei der Auswertung des Videomaterials zu kompensieren. In der folgenden Abbildung 4.4 ist eine Videoaufnahme mit der gekennzeichneten Stelle, dem ersten DOT an der Position 500 mm dargestellt, an der die Geschwindigkeiten der Steine gemessen werden.

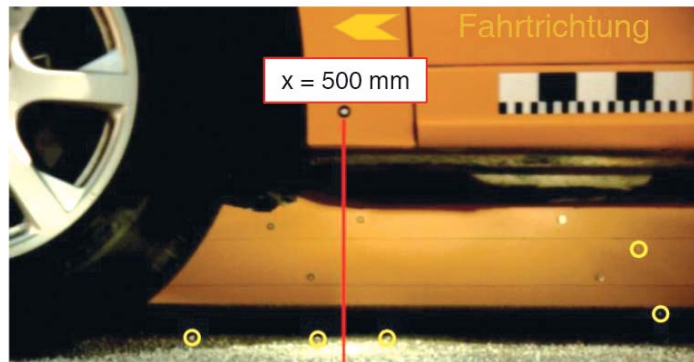


Abbildung 4.4: Messpunkt der Steingeschwindigkeit am ersten DOT bei der Position $x = 500 \text{ mm}$ (gespiegelte Darstellung). Fliegende Steine sind hier gelb markiert.

4.1.1.2 Reifen

Für die Fahrversuche wurden drei Reifenarten eingesetzt: Sommerreifen Michelin Latitude Diamaris in der Dimension 235/65 R17 104W, Winterreifen vom Typ Dunlop SP Wintersport 3D in der Dimension 235/65 R17 104V und als Slick ein abgeschliffener Sommerreifen Continental CrossContact UHP in der Dimension 235/65 R17 104V (Abbildung 2.13, Kapitel 2 4.1). Der empfohlene Reifeninnendruck vom Hersteller liegt bei Sommerreifen bzw. Slicks 2,1 bar und wurde bis auf einen minimalen Reifendruck von 1,5 bar und einen maximalen Reifendruck von 3,5 bar im Versuch geändert. Bei Winterreifen liegt der empfohlene Reifeninnendruck bei 2,3 bar, der min. Reifendruck bei 1,5 bar, der max. Reifendruck liegt bei 3,5 bar.

Zur Veranschaulichung (Anhang 9.13) der Verformung des Reifens durch den unterschiedlichen Innendruck, wurde die Reifenaufstandsfläche (Latschfläche) mittels einer drucksensiblen Folie aufgenommen und mit einer Bildanalysesoftware vermessen. In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der Latschflächen, die Abweichung vom empfohlenen Innendruck und der Druck, der auf die Fahrbahn wirkt, dargestellt.

Tabelle 4.2: Reifenaufstandsfläche bei Winter-, Sommer- und profillosen Reifen

Reifentyp	Reifeninnendruck	1,5 bar	2,1 / 2,3 bar	3,5 bar
Winterreifen	Latschfläche in mm^2	9699	9088	8423
	Druck in N/mm^2	0,524	0,560	0,604
Sommerreifen	Latschfläche in mm^2	14369	11704	8377
	Druck in N/mm^2	0,351	0,431	0,602
Slick	Latschfläche in mm^2	26797	21809	15083
	Druck in N/mm^2	0,188	0,231	0,334

4.1.1.3 Versuchsstrecke und verwendete Projektile

Für die Splitterprobung von Prototypen wird bei Audi ein definierter 2/5 Edel-Kiessplitt verwendet. Diese Splittmischung wird auch von den Winterdiensten in Österreich auf die Autobahnen gestreut. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnungen entspricht den Vorgaben der DIN EN 13043 (Anhang 9.15). Die Steinmasse ist für die Berechnung der kinetischen Energie eines Steines von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden die Steine des Splitts in der folgenden Tabelle 4.3 nach Größe und Gewicht kategorisiert (Anhang 9.16).

Tabelle 4.3 Steinkategorien

Kategorie	Größe in mm	Gewicht in g	Anteil in %
1	7 – 12	0,40 – 2,55	≈ 2
2	4 – 7	0,10 – 0,39	≈ 6
3	2 – 4	0,03 – 0,09	≈ 68
4	0 – 2	0 – 0,02	≈ 14

4.1.1.4 Versuchsdurchführung

Bei der Analyse des Steinabwurfs vom Reifen wurde die grundsätzlich hohe Anzahl verschiedener Einflussparameter (Anhang 9.1) auf die Parameter eingegrenzt, die für die Untersuchung der verschiedenen Fahrsituationen besonders bedeutungsvoll sind (konstante Fahrt mit definierter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung) (Tabelle 4.4). Aus dieser Versuchsmatrix ergab sich ein Versuchsplan von 18 Versuchsreihen pro Reifentyp. Dieser Versuchsplan ist in der Tabelle 4.5 dargestellt. Bei den Versuchsreihen der konstanten Fahrt wurden zuerst Fahrgeschwindigkeiten von 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h und 80 km/h untersucht. Nach Auswertung der ersten Versuchsreihe wurden die Fahrgeschwindigkeiten 20 km/h und 60 km/h aus dem Versuchsprogramm gestrichen (Erklärung im Kapitel 5.1.1.1). Für den Versuchsplan wurde die Fahrgeschwindigkeit 40 km/h und 80 km/h gewählt.

Bei der Versuchsreihe mit einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h war infolge der kurzen Versuchsstrecke von ca. 210 m ein Regulieren der Geschwindigkeit mit dem Tempomat nicht möglich. Dies verursachte Abweichungen von bis zu 15 km/h. Aus diesem Grund wurde die Geschwindigkeit bei den Versuchen mit 80 km/h im

Messbereich manuell mit dem Tachometer konstant gehalten und im Nachgang mit den GPS-Koordinaten validiert.

Tabelle 4.4: Übersicht der Einflussparameter bei verschiedenen Fahrsituationen

Parameter	Konstante Fahrt			Beschleunigung			Verzögerung			
	40	80		40	80		40	80		
Fahrgeschwindigkeit in km/h										
Reifeninnendruck in bar	1,5	2,1	3,5	1,5	2,1	3,5	1,5	2,1	3,5	
Reifenprofil	SR	WR	Slick	SR	WR	Slick	SR	WR	Slick	

Tabelle 4.5: Versuchsplan für einen Reifentyp

Versuchs-Reihe	Geschwindigkeit in km/h			Reifendruck in bar			Fahrsituation		
	0	40	80	1,5	2,1	3,5	Konstant - Fahrt	Beschl. - Fahrt	Bremsen (Verzögerung)
1	x			x				x	
2	x				x			x	
3	x					x		x	
4		x		x			x		
5		x		x				x	
6		x		x					x
7		x			x		x		
8		x			x			x	
9		x			x				x
10		x				x	x		
11		x				x		x	
12		x				x			x
13			x	x			x		
14			x	x					x
15			x		x		x		
16			x		x				x
17			x			x	x		
18			x			x			x

Bei der Versuchsreihe „Beschleunigungsvorgang“ wurden zwei Fahrsituationen betrachtet: zum einen das Anfahren, bei der die Motordrehzahl im Stand auf 2500 Umdrehungen pro Minute gehalten, die Kupplung schlagartig gelöst und gleichzeitig mit maximalem Antriebsmoment beschleunigt wurde (Volllastbeschleunigung). Zum anderen die Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h, bei der im Messbereich des Kamerasystems unter Volllast beschleunigt wurde. Diese Untersuchungen ermöglichten die Betrachtung des Einflusses des Reifenschlupfs auf die Flugbahn der Steine.

Zur Vermeidung von Störgrößen (Wetter, Messfehlern) in den Versuchsreihen, wurden Maßnahmen wie Blockbildung und Randomisierung (Zufallsmechanismus) durchgeführt. Bei der Randomisierung werden die unbekannt Störgrößen über eine beliebige Versuchsreihenfolge gestreut. Unterdessen werden bei der Blockbildung gezielt Einflussparameter verändert, um die Störgrößen systematisch zu verteilen. Alle Versuchsparameter und Informationen zum Versuch wurden in einer Datenbank protokolliert. So wurden vor jeder Versuchsfahrt die folgenden Parameter in die Datenbank eingegeben: fortlaufende Nummer der Messfahrt, Zeitpunkt (Datum, Uhrzeit), Versuchsfahrzeug, Prüfer, Prüfstrecke, Streckenzustand, Befeuchtung, Geschwindigkeit, Gang, Reifentyp, Reifeninnendruck, Reifenprofiltiefe, Umgebungstemperatur, Fahrzustand, Assistenzsysteme, Beladungszustand, Kameraeinstellungen (Objektiv, Brennweite, Schärfe, Blende, Kameraabstand, Auflösung, Bildrate) (Bild im Anhang 9.32).

4.1.1.5 Methodik der Auswertung

Bei der Analyse der Daten aus den Aufnahmen der High-Speed-Kamera werden die Flugbahnen der Steine im ortsfesten Bezugssystem (Inertialsystem) veranschaulicht. Damit wird versucht die Einflussparameter, die auf die Steinflugbahn wirken, im ortsfesten Bezugssystem nachzuweisen. Das raumfeste Bezugssystem hingegen zeigt die Bewegung der Steine relativ zur Straße. Dadurch können die Absolutgeschwindigkeiten der Steine, welche für die kinetische Energie und den Impuls relevant sind, bestimmt werden. Zur Darstellung eines Abwurfprofils in Bezug auf das Fahrzeug wurden die aus der Videoanalyse Software FalCon ermittelten Daten in ein fahrzeugfestes Bezugssystem (Relativsystem) umgerechnet. Das fahrzeugfeste Bezugssystem zeigt die Bewegung der Steine relativ zum Fahrzeug. Die Daten sind

relevant für die Darstellung der steinschlaggefährdeten Bereiche am Fahrzeug und die daraus resultierende Schädigung. In der Abbildung 4.5 ist das Inertialsystem in blau und das Relativsystem in rot dargestellt. Die Markierungen (DOTs) am Fahrzeug fungieren dabei als Orientierungspunkte bei der Umrechnung vom Inertialsystem in das Relativsystem. Beispielsweise wird bei konstanter Fahrt die Umrechnung mit der Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzeuges aus den Messwerten eines DOTs herangezogen. Hingegen wird bei Beschleunigungsfahrten der Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeuges über den Auswertungsbereich berücksichtigt.

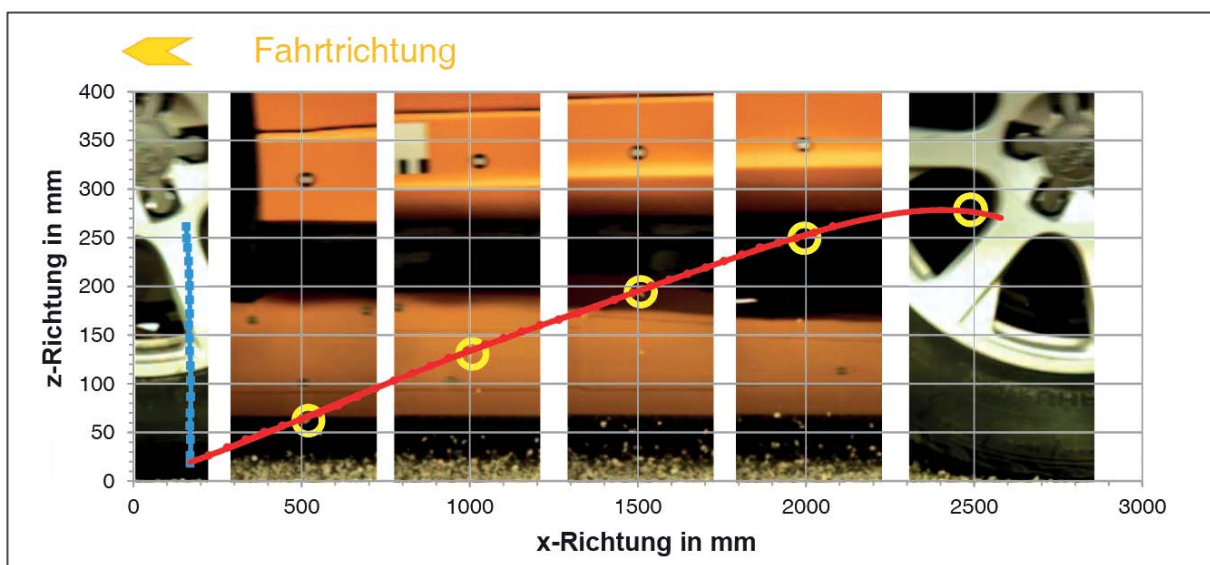


Abbildung 4.5: Darstellung einer Steinflugbahn (gespiegelte Darstellung). Die blaue Linie zeigt die Steinflugbahn im ortsfesten Bezugssystem (Inertialsystem) und die rote Linie ist im Vergleich zur kongruenten Steinflugbahn im fahrzeugfesten Bezugssystem (Relativsystem) dargestellt [30].

Der Auswertung der Steinflugbahnen aus den Videodaten lagen definierte Auswahlkriterien zugrunde. Dabei wurden nur Steine oberhalb einer Mindestflughöhe von 100 mm ausgewertet. Steine, die sich unterhalb der Mindestflughöhe von 100 mm bewegten, wurden nicht ausgewertet, da sie keinen Schaden an der Karosserie verursachen können. Zur Vereinfachung der Versuchsauswertung wurden maximal 10 Steine pro Videoaufnahme detektiert. In der folgenden Abbildung 4.6 ist dieser definierte Messbereich am Fahrzeug visuell dargestellt.

Für die Auswertung der Videoaufnahmen wurden folgende Kriterien zur Auswahl der zu analysierenden Steine mit dem größten Schädigungspotential definiert:

- Steine, die sich innerhalb des definierten Messbereiches bewegen
- Aufprall der Steine am Fahrzeug bzw. Reifen
- Maximale Flughöhe der Steine
- Steilste Flugbahn der Steine
- Mindesthöhe von 100 mm
- Größte Steine
- Maximal 10 Steine pro Versuch werden zur Vereinfachung detektiert



Abbildung 4.6: Darstellung des definierten Messbereiches der Steinflugbahn

Die Aufteilung des Messbereiches und die Übertragung in das Abwurfprofil werden in Abbildung 4.7 erläutert. Die Rasterung für das Abwurfprofil beginnt ab einer Höhe von 100 mm in z-Richtung und erstreckt sich über die Länge von 3000 mm in x-Richtung. Dieser definierte Messbereich wurde dabei in 6 x 6 Felder unterteilt (grau hinterlegter Bereich). Die Anfangs- und Endpunkte jeder Steinflugbahn wurden durch eine Markierung hervorgehoben und gaben damit die Art bzw. die Situation des letzten Punktes in der Auswertung an. Die einzelnen Felder wurden dann auf die Zahl der durchquerenden Flugbahnen der Steine analysiert. Diese Methode diente zur Vergleichbarkeit der Steinflugbahnen bei verschiedenen Versuchsfahrten.

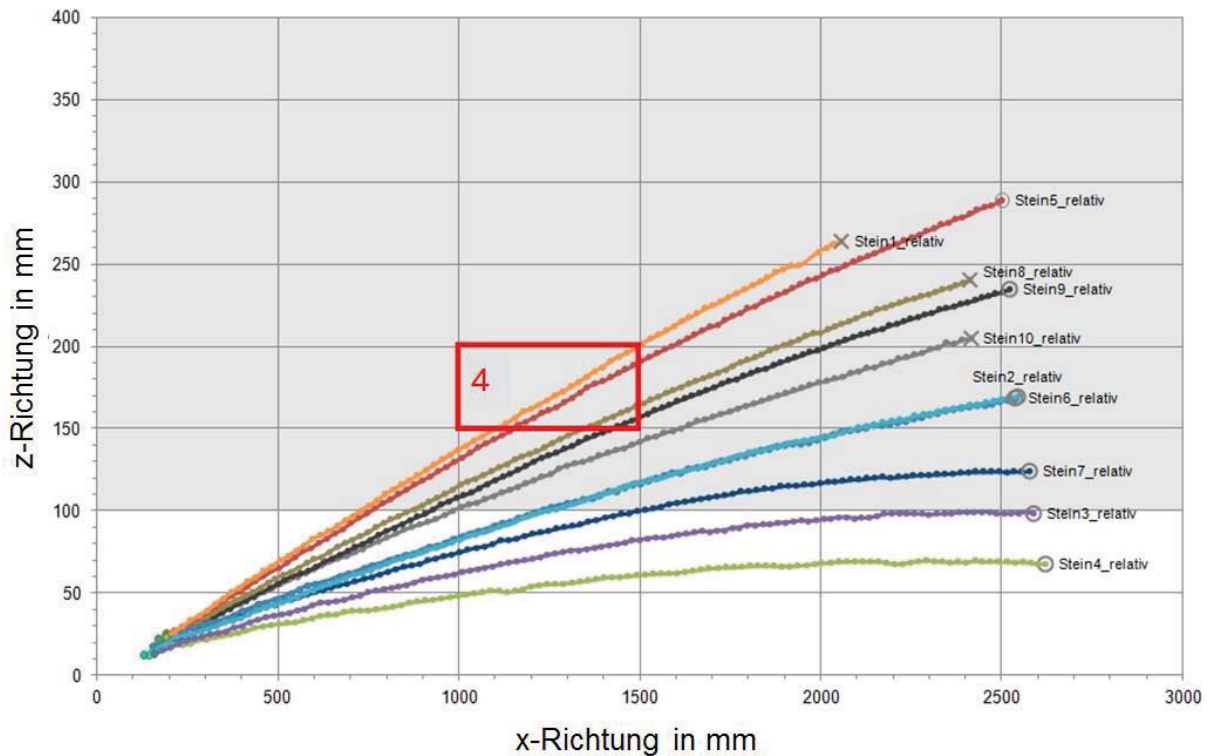


Abbildung 4.7: Unterteilung des Abwurfprofils in 36 Felder. Jedes Feld wird auf die durchquerenden Steinflugbahnen hin ausgewertet.

4.1.2 Fahrzeugfestes Kamerasystem

4.1.2.1 Versuchsaufbau

Die High-Speed-Kamera wurde zum Schutz außerhalb des steinschlaggefährdeten Bereiches am Fahrzeug seitlich vom Reifen positioniert (Abbildung 4.8). Zur Ausleuchtung diente eine LED-Leiste, welche über das 12 V Bordnetz versorgt wurde. Das Notebook zur Steuerung der Kamera wurde ebenfalls an das Fahrzeugbordnetz angeschlossen.



Abbildung 4.8: Versuchsaufbau des fahrzeugfesten Kamerasystems am Versuchsfahrzeug

4.1.2.2 Versuchsreihe

Die Aufnahmen des am Fahrzeug fest installierten High-Speed-Kamerasystems waren auf den Abwurf der Steine am Reifen bzw. an der Lauffläche des Reifens fokussiert. Die Versuchsreihe ermöglichte Aufnahmen über einen längeren Zeitraum. Dabei wurden die verschiedenen Fahrzustände, wie konstante Fahrt bei 40 und 60 km/h, Anfahren, Beschleunigung des Fahrzeugs bei einer Geschwindigkeit 20 und 40 km/h und der Einfluss des Lenkeinschlags (Lenkwinkel von 10°), nacheinander durchlaufen. Versuche mit konstanter Fahrt bei 80 km/h waren auf Grund der Instabilität der Konstruktion (Vibration und große Bewegungen) nicht möglich, daher erfolgten Versuche mit 60 km/h. Der gleiche Sicherheitsaspekt galt auch bei den Versuchsreihen zum Einfluss des Lenkwinkels und bei den Fahrten mit Beschleunigung bei 20 und 40 km/h, weshalb nur Fahrgeschwindigkeiten von 20 und 40 km/h durchgeführt wurden (Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Versuchsplan, fahrzeugfester Versuchsaufbau; Sommerreifen; 2,1 bar

Versuchs-Reihe	Geschwindigkeit in km/h				Lenkwinkel in °	Fahrsituation		
	0	20	40	60		Konstant - Fahrt	Beschl. - Fahrt	Bremsen (Verzögerung)
1			x		10	x		
2				x	10	x		
3		x			10	x		
4			x		10	x		
5	x				10		x	
6		x			10		x	
7			x		10		x	

Die Versuchsfahrten mit einer Verzögerung wurden aus diesem Versuchsplan herausgenommen, da eine Vollbremsung zum Schutz des Kamerasystems nicht durchgeführt wurde. Die Aufnahmen dieser Versuchsreihe mit fahrzeugfestem Kamerasystem dienten zum Verständnis und wurden als Beispiel herangezogen. Eine tiefere Auswertung dieser Daten wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen, vielmehr dient diese Versuchsreihe der Validierung der Ergebnisse aus den Aufnahmen des ortsfesten Kamerasystems.

4.2 Analyse der Oberflächenschädigung anhand von Steinschlagversuchen

Um definierte Schädigungen von Steinschlägen auf lackierten Proben produzieren zu können, wurde mithilfe eines eigens entwickelten Steinschlagprüfstands, in einem Fallturm, der Einfluss verschiedener Parameter (Masse, Energie, Auftreffwinkel usw.) unter Laborbedingungen untersucht.

4.2.1 Versuchsaufbau

Der Fallturm ermöglichte gezielte reproduzierbare Analysen des Schädigungsverhaltens von lackierten Oberflächen. In Abbildung 4.9 ist der Versuchsaufbau des Fallturms dargestellt. Das Grundgestell besteht im Wesentlichen aus einem 5-teiligen Rohr, einem Seilzug mit Hubmechanismus, einer Probenaufnahme und einem winkelverstellbaren Proben­tisch. Der Fallturm war 15 m hoch und hatte einen Außendurchmesser von 323 mm.

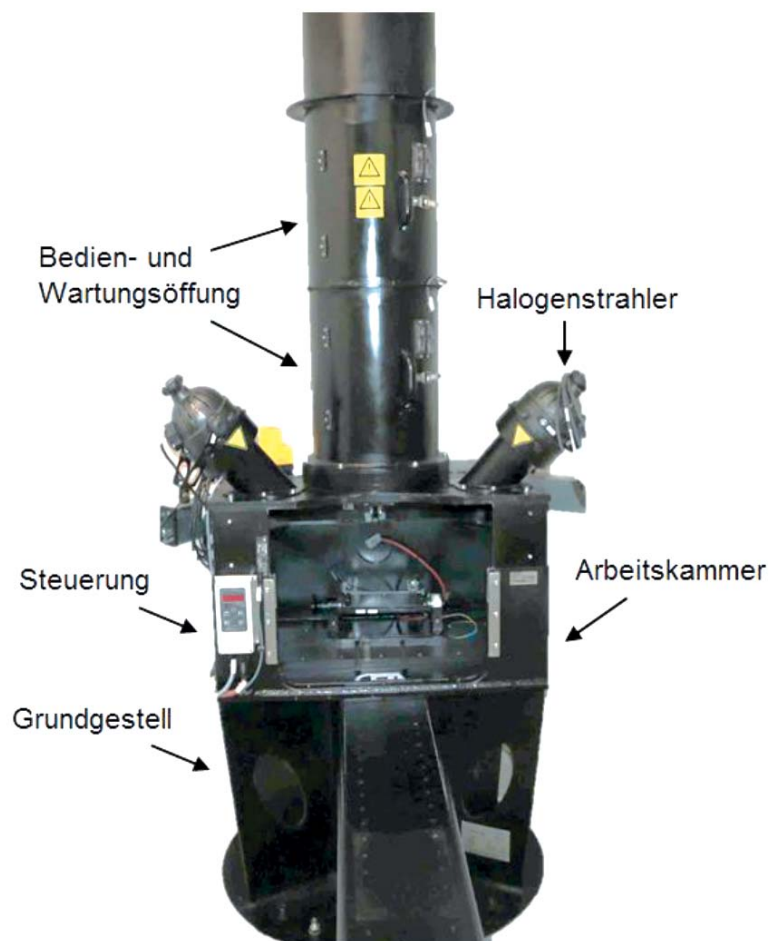


Abbildung 4.9: Darstellung des Fallturms (Steinschlag-Prüfstand)

Die Fallvorrichtung bestand aus einer Linearführung und einem Führungswagen. Der Antrieb erfolgte über einen Getriebemotor. Dadurch konnte die Fallvorrichtung an jeder Position sicher gehalten werden. Die Fallvorrichtung war fest an das Seil gekoppelt und für Probengewichte bis 200 g ausgelegt. Für Bedien- und Wartungszwecke gab es im unteren Bereich des Rohres zwei Öffnungen mit Deckel. Der Bedienungszug war für das Bestücken der Probenaufnahme vorgesehen. Die Projektile wurden durch die Bedienöffnung in einem pneumatisch auslösenden zweiflügligen Probeaufnahme (Greifer) positioniert.

Eine transparente Acrylglas-Schutzscheibe ermöglichte Aufnahmen des Steinschlagvorgangs mit einer High-Speed-Kamera. Als Lichtquelle für die High-Speed-Aufnahmen und zur Ausleuchtung der Arbeitskammer dienten zwei Halogenstrahler, die oberhalb der Arbeitskammer montiert waren (Abbildung 4.10).

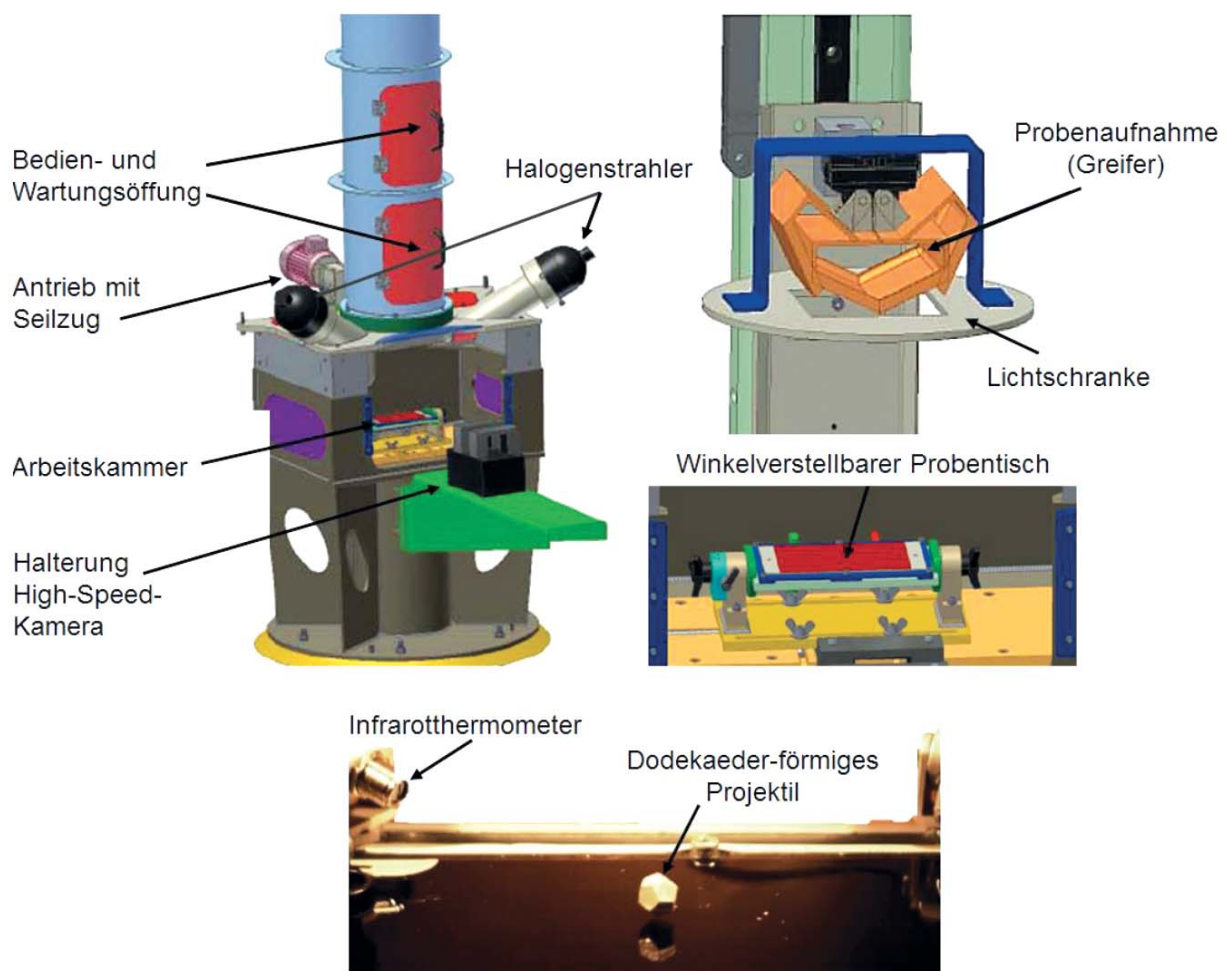


Abbildung 4.10: Funktionsmechanismen des Fallturms mit Arbeitskammer, winkelverstellbarem Probenstisch mit einer Silicon-Heizmatte und der zweiflügeligen Probenaufnahme

In der Arbeitskammer am unteren Ende des Fallrohres war ein winkelverstellbarer Proben­tisch mit einer Probenaufnahmefläche von 200 mm x 100 mm mittig zum Fallrohr positioniert. Die Probenplatte lag planar auf dem Proben­tisch (Abbildung 4.11) und war um die Längsachse im Winkelbereich von 0° bis 90° verstellbar. Der winkelverstellbare Proben­tisch war in der Horizontalachse im Bereich von ± 80 mm in x-Richtung und ± 50 mm in y-Richtung einstellbar. Der Proben­tisch war zusätzlich mit einer temperaturregelbaren Heizmatte ausgestattet. Bei Versuchen unterhalb der Raumtemperatur konnten die Probenplatten in einem Kälteschrank auf die gewünschte Temperatur bis zu ca. minus 20 °C gekühlt werden. Durch zwei Infrarotthermometer wurde die exakte Oberflächentemperatur der Probe zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gemessen.

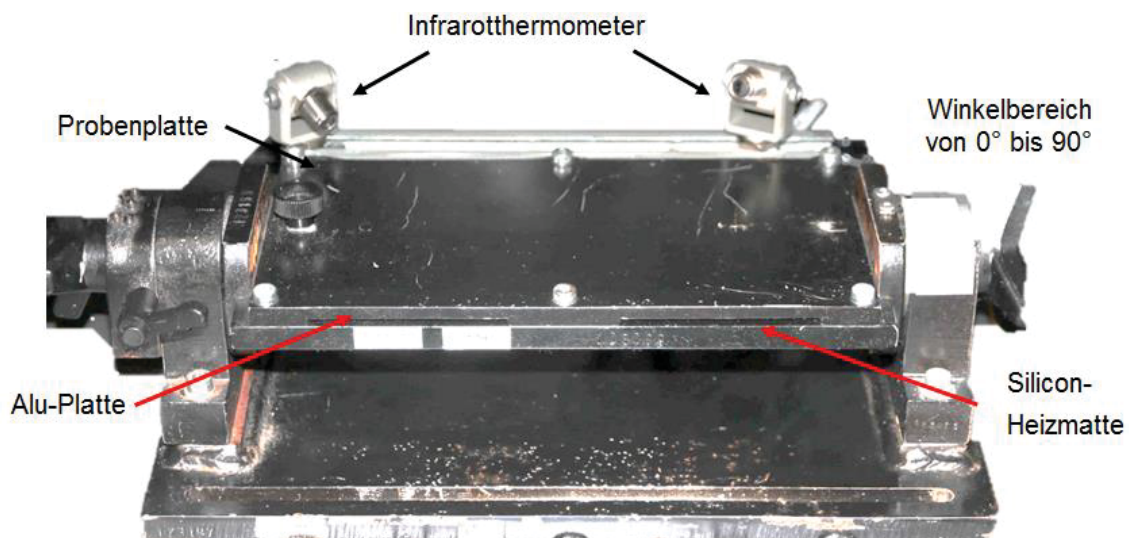


Abbildung 4.11: Winkelverstellbarer Proben­tisch mit einer Silicon-Heizmatte, verstärkt durch eine Aluminiumplatte

Alle aufgenommenen Mess-Signale (Fallzeit, Fallgeschwindigkeit, Oberflächentemperatur der Probenplatte) und Parameter (kinetische Energie, Masse, Form des Projektils usw.) wurden in einem zentralen Mess- und Datenerfassungs-System (National Instruments) verarbeitet, über eine LabView-Oberfläche zur Verfügung gestellt und nach jedem Versuch in einer Microsoft-Office-Excel-Tabelle protokolliert.

4.2.1.1 Berechnung und methodische Beschreibung des Fallturms

Die kinetische Energie, die unmittelbar vor bzw. beim Aufprall des Projektils auf der Oberfläche der Probenplatte auftritt, wurde durch folgende Methode definiert.

Hierbei wurde die mittlere Geschwindigkeit \dot{z}_m der Projektile durch die Fallzeit Δt sowie zurückgelegten Wegstrecke Δs ermittelt. Die Aufprallgeschwindigkeit ist dabei doppelt so groß wie die aus $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ berechnete mittlere Fallgeschwindigkeit.

$$\dot{z}_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Zur Messung der Fallzeit war unmittelbar vor dem Greifer und oberhalb des Probenstückes eine Hochgeschwindigkeits-Lichtschranke befestigt. Die zwei Lichtschranken waren Rahmenlichtschranken und dienten als detektierende Elemente mit einem Überwachungsbereich von 200 mm x 120 mm. Die Ansprechzeit betrug weniger als 0,1 ms und das kleinste detektierbare Objekt hatte eine Größe von 2 mm. Die Wegstrecke setzt sich aus dem Abschnitt zwischen der ersten und zweiten Lichtschranke zusammen (Abbildung 4.12). Unter Berücksichtigung des Auftreffwinkels β des Projektils auf die Probenplatte, ergibt sich folgender Zusammenhang, der im Folgenden schematisch dargestellt ist.

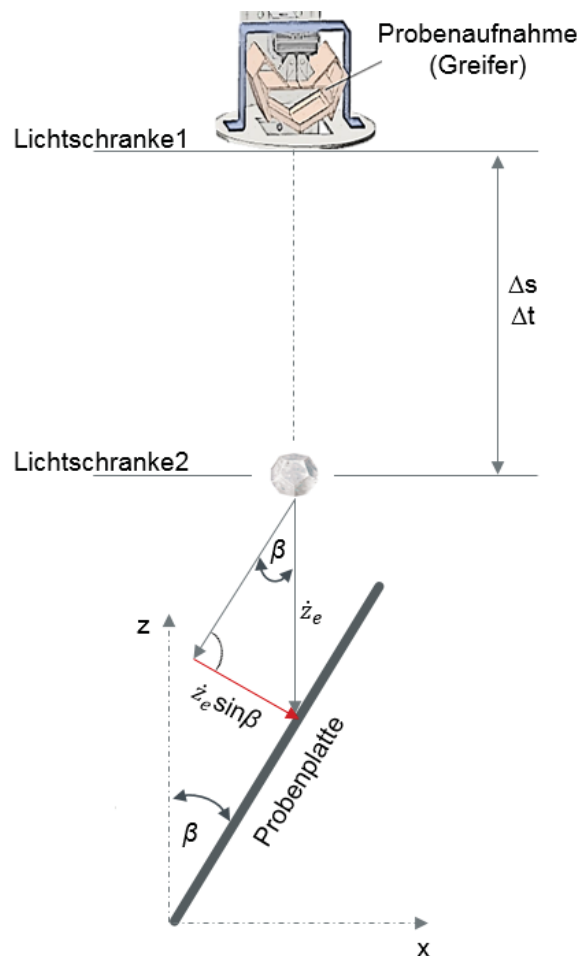


Abbildung 4.12: Aufprallgeschwindigkeit \dot{z}_e , und ihre Komponente senkrecht zur Probenplatte in Abhängigkeit des Winkel β

Aus der Aufprallgeschwindigkeit \dot{z}_e , der Steinmasse m und dem Auftreffwinkel β des Projektils auf die Probenplatte lässt sich somit die kinetische Energie des Projektils vor dem Aufprall ermitteln.

$$E = \frac{m}{2} \cdot (\dot{z}_e)^2 \quad (4.2)$$

4.2.1.2 Projektile

In der ersten Versuchsreihe wurde als Projektil der definierte Edel-Kiessplitt aus der Versuchsstrecke der Splitterprobung des Prüfgeländes verwendet. Diese Steine sind nach DIN EN 13043 als 2/5 Edel-Kiessplitt spezifiziert und eignen sich für einen Vergleich zwischen der Versuchsreihe mit den Fahrversuchen zur Ermittlung der Steinflugbahn und der Versuchsreihe der Oberflächenschädigung durch Steinschlag im Fallturm. In der Abbildung 4.13 ist der typische Versuchsstein dargestellt.

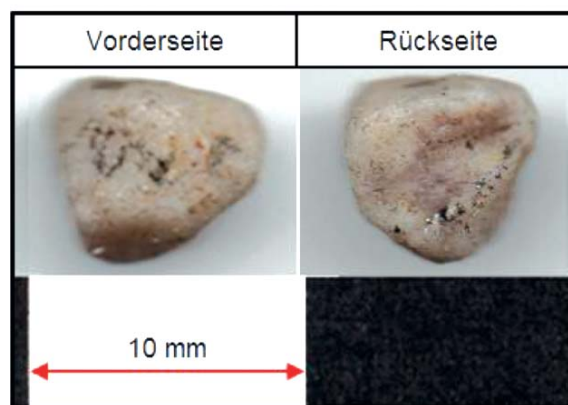


Abbildung 4.13: Projektil für Versuche im Fallturmprüfstand: Stein (Gewicht 0,29 g und Durchmesser 6,14 mm)

Um möglichst reproduzierbare Schädigungen der Lackoberfläche erzielen zu können, wurden symmetrische Projektile verwendet. Die Symmetrie eines Körpers lässt sich durch die Anzahl der Symmetriegruppen beschreiben. Die Existenz einer Symmetriegruppe bedeutet, dass ein Objekt durch Bewegungen wie z.B. eine Rotation auf sich selbst abgebildet werden kann. Hinzu kommt, dass mit zunehmender Anzahl an Ecken und Kanten das Schädigungspotential steigt und gleichzeitig die Variation der Einschlagsformen abnimmt. Je symmetrischer das Projektil ist, desto weniger Variationen des Einschlags werden verursacht und desto besser können die Einflüsse anderer Parameter, wie beispielsweise die Energie oder der Auftreffwinkel des Einschlags untersucht werden. Aus dem Vergleich von Symmetriegruppen, Eckenraumwinkel, Anzahl der Ecken und Härte ergab sich, dass ein dodekaedrischer

Körper am besten als Projektil geeignet ist. Daraus folgend wurden speziell angefertigte geometrische Projektile in der Form eines Pentagondodekaeders für die Versuchsreihe im Fallturm verwendet. Der Pentagondodekaeder hat eine symmetrische Fünfeckform mit 12 Flächen, 20 Ecken und 30 gleich langen Kanten. Fünf dieser Dodekaeder-Projektile mit unterschiedlicher Masse (von 0,5 g bis 1,55 g) wurden aus Gesteinsmaterial (2/5 Edel-Kiessplitt) angefertigt (Abb. 4.14). In der Tabelle 4.7 sind die Masse, Durchmesser und die maximalen Fallgeschwindigkeiten der fünf Dodekaeder-förmigen Projektile bei einer Fallhöhe von 15 m dargestellt.

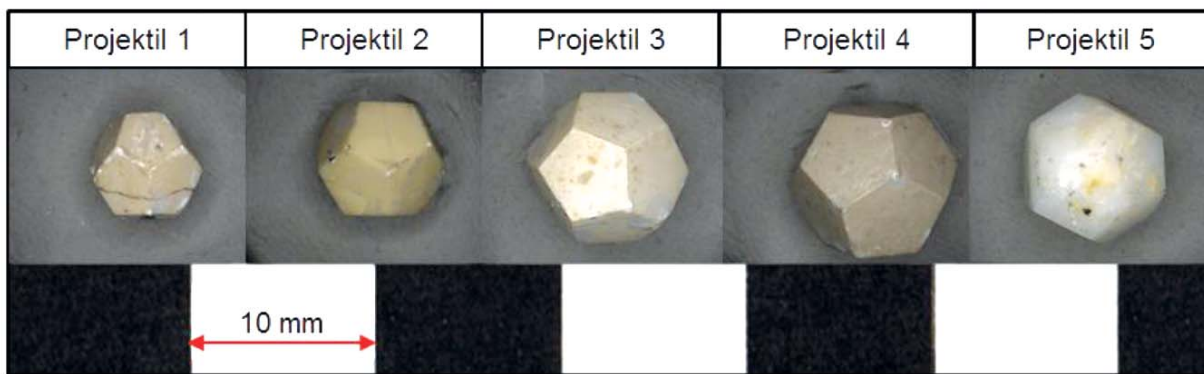


Abbildung 4.14: Darstellung der Dodekaeder-förmigen Projektile 1 bis 5 für den Fallturmprüfstand

Tabelle 4.7: Projektil Dodekaeder: im Fallturm gemessene max. Fallgeschwindigkeit

Projektil Dodekaeder	Masse in g	Durchmesser in mm	Fallhöhe 15 m: max. Geschwindigkeit	
			m/s	km/h
1	0,5	6,6	16,9	60,8
2	0,8	7,6	16,9	60,8
3	1,1	8,8	17,1	61,6
4	1,55	9,8	17,2	61,9
5	1	8,6	17,1	61,6

Um eine definierte Analogie von Schädigungen in Abhängigkeit von der Aufprallenergie herbeiführen zu können, wurde die angestrebte Energie beim Aufprall je Projektil in eine definierte Fallhöhe umgerechnet (Abb. 4.15). Die weiteren

Versuchsreihen im Fallturm-Prüfstand basierten in dieser Arbeit auf die angestrebte Energie beim Aufprall der Tabelle 4.8, da diese reproduzierbare Ergebnisse lieferten und eine Grundlage für eine Ausarbeitung von Schädigungscharakteristika ermöglichten. Zusätzlich erlaubte diese Methodik eine Korrelation zwischen Schädigungen aus Realversuchen und Fallturmversuchen.

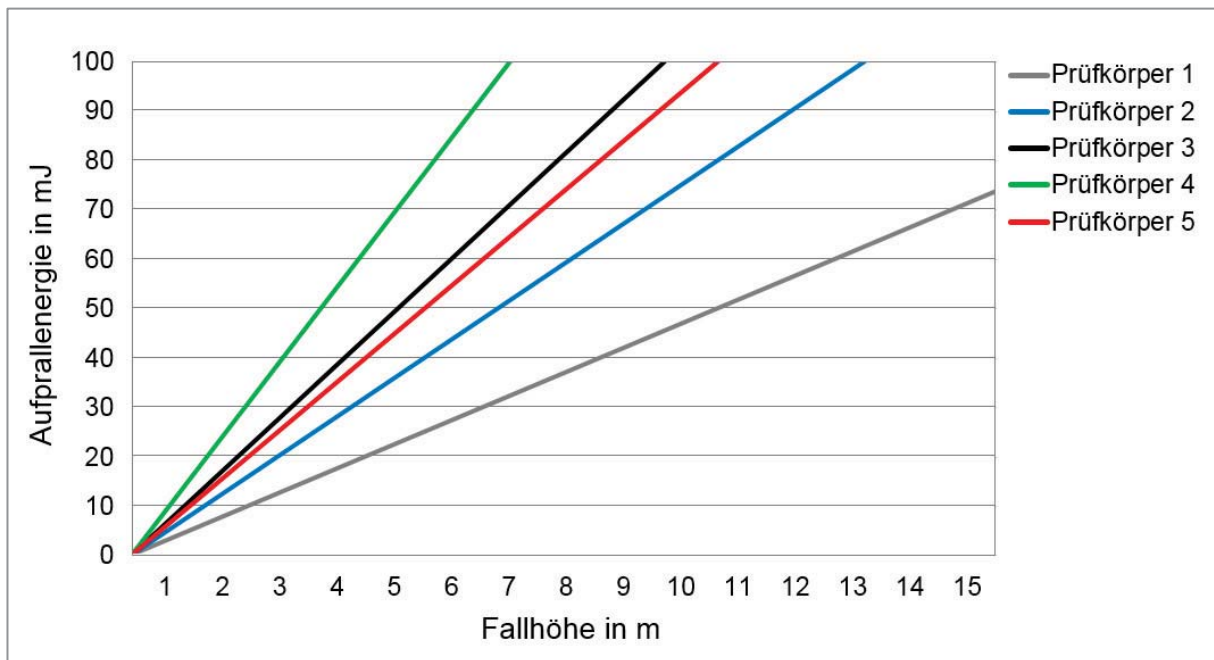


Abbildung 4.15: Angestrebte Energie beim Aufprall der fünf Dodekaeder-förmigen Projektile in Abhängigkeit der Fallhöhe

Tabelle 4.8: Fallhöhe zum Erreichen der angestrebten Energie beim Aufprall der fünf Dodekaeder-förmigen Projektile

Projektil \ Aufprall-Energie	Aufprall-Energie			
	20 mJ	30 mJ	40 mJ	50 mJ
1	4,08 m	6,12 m	8,15 m	10,19 m
2	2,55 m	3,82 m	5,10 m	6,37 m
3	1,85 m	2,78 m	3,71 m	4,63 m
4	1,32 m	1,97m	2,63 m	3,29 m
5	2,04 m	3,05 m	4,08 m	5,10 m

4.2.2 Versuchsdurchführung

Bei der Steinschlagsimulation werden die Auftreffwinkel der Steine als farbige Punkte, die einer Schädigungsklasse zugeordnet sind, auf die Karosserieaußenhaut projiziert. Das Ziel ist dabei, den Auftreffwinkeln aus der Simulation eine passende Schädigung aus den Fallturmversuchen zuzuordnen. So kann ein Vergleich zwischen Steinschlagsimulation und praktischen Versuchen gezogen werden. Aus diesem Grund orientierte sich die Auswahl der Winkel für die Fallturmversuche an der Simulation. Die Auftreffwinkel waren 6°, 9°, 12°, 15°, 18°, 21°, 24°, 27°, 30°, 35°, 40° und 45°. Der Winkel von 3° wurde aus der Versuchsreihe entfernt, da hier die Projektionsfläche nur 5 mm beträgt (Anhang 9.22) und die Wahrscheinlichkeit, den 5 mm breiten Bereich der Probenplatte zu treffen, zu gering ist. Der Versuchsplan für die Versuche im Fallturm ist in Tabelle 4.9 wiedergegeben.

In der ersten Versuchsreihe wurden unterschiedliche Auftreffwinkel von 6 bis 45° mit definierten Steinen aus Kiesel-Splitt mit gleicher Masse bei zwei Fallhöhen (5 und 10 m) untersucht. Die Probenplatte bestand aus Stahl mit einem vollständigen Lackaufbau analog einer schwarz lackierten Karosserieaußenhaut eines Fahrzeuges. Die Versuchstemperatur betrug 20 °C.

Um reproduzierbare Schädigungen zu generieren, wurde die Zahl der Einflussparameter in der zweiten Versuchsreihe reduziert. Es wurde ausschließlich der Stein aus der Abbildung 4.13 (Durchmesser 6,14 mm, Masse 0,29 g) bei einer Fallhöhe von 15 m bei einer berechneten Energie, vor dem Aufprall von 27 mJ untersucht.

Für die dritte Versuchsreihe wurden die Dodekaeder-förmigen Steine 1 bis 5 (Abbildung 4.14) bei einer Aufprallenergie von 30 mJ bei einem Auftreffwinkel von 21° untersucht, um die Vergleichbarkeit der Schädigungen bei gleichen Bedingungen (Auftreffwinkel, Energie und Temperatur) zu ermitteln. Die Versuche wurden in Abhängigkeit von der Masse des Projektils durchgeführt, die dafür benötigte Fallhöhe wurde aus der Tabelle 4.8 entnommen.

In der vierten Versuchsreihe wurde mithilfe des Dodekaeder-förmigen Projektils 5 (1g) der Einfluss des Auftreffwinkels (6 bis 45°) auf die Oberflächenschädigung bei einer kinetischen Energie von 30 mJ untersucht.

Das Ziel der fünften Versuchsreihe war es, eine Korrelation zwischen Energie und Schädigungsparameter zu finden. Mit Orientierung an der Panzerformel [42] wurden Schädigungsintensitäten bei verschiedenen Energien von 20, 30 und 40 mJ und einem Auftreffwinkel von 90° bei Raumtemperatur ermittelt.

Tabelle 4.9: Versuchsplan der Steinschlagversuche im Fallturm-Prüfstand

Versuchsreihe	Projektil	Auftreffwinkel in °	Energie in mJ	Fallhöhe in m	Grundmaterial	Temp. in °C
1	Stein: 0,4 g Ø7 mm	6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 35, 40, 45		5, 10	Stahl (Elo-Zink)	RT
2	Stein: 0,29 g, Ø6,14 mm	6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 35, 40, 45	27	15	Stahl	RT
3	Dodekaeder 1 bis 5	21	30	Tab. 4.7	Stahl	RT
4	Dodekaeder 5	6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 35, 40, 45	30	3,25	Stahl	RT
5	Dodekaeder 5	90	20, 30, 40	2,15; 3,25; 4,45	Stahl	RT

Die Projektileinschläge auf der beschichteten Oberfläche wurden im Anschluss an einen Fallturmversuch mit Hilfe eines digitalen Auflichtmikroskops der Firma KEYENCE, Typ VHX-1000, analysiert. Dieses Mikroskop verfügt über mehrere Objektive mit einem Zoombereich von 20-facher bis 1000-facher Vergrößerung.

Zur Bewertung der Schädigungsintensität wurde der Einschlagbereich auf der Probenplatte ausgestanzt (Anhang 9.20), das Blechstück mit Hilfe einer Probenpresse planar auf einem Probenhalter fixiert und in einem Konfokalmikroskop Typ Leica DCM 3D (Anhang 9.21) untersucht. Das Konfokalmikroskop ermöglicht die Untersuchung von Oberflächenstrukturen mit einer Auflösung von bis zu 1 µm [53]. Die Analyse der Schädigung erfolgt nach der Interferometrie- und Konfokal-Technologie. Der Konfokalsensor liefert ein Signal, das je nach Abstand zwischen Messobjekt und Fokus unterschiedlich stark ist. Bei der Konfokaltechnik wird das Messobjekt um eine bestimmte Länge verschoben und mit der Referenz verglichen [37]. Die Oberflächenerfassung läuft dabei über die Software LeicaScan. Durch die digitale

dreidimensionale Darstellung lassen sich folgende Schädigungsparameter zur Charakterisierung der Einschläge ableiten:

- Maximale Schädigungstiefe
- Maximale Höhe der Aufwölbung
- Oberfläche der Mulde
- Oberfläche der Spitze
- Volumen des Einschlags

Ein Schliffbild ermöglicht die Untersuchungen der Schädigung jeder Lackschicht, die normalerweise durch eine 3D-Messung nicht erfasst wird. Aus dem Querschnitt des Einschlags kann die Schädigungsart und der Schädigungsgrad festgestellt werden. Es wurden drei verschiedene Einbettmittel ClaroFast, ViaFix und DuroCit, die sich in ihrer Aushärtezeit, Härte und Transparenz unterscheiden, für die Probenpräparation verwendet.

Zu Beginn jeder Versuchsreihe war zur Validierung des Beschichtungsaufbaus die Lackschichtdicke auf den Probepplatten zu bestimmen, da es trotz standardisiertem Lackierungsverfahren zu Schwankungen in den Lackschichten bzw. im Lackaufbau kommen kann. Dies erfolgte mit dem Schichtdickenmessgerät der Firma Erichsen, Typ PAINT BORER 518 MC [54]. Der PAINT BORER arbeitet nach dem Keilschnittverfahren, bei dem die Probenoberfläche unter einem definierten Winkel bis zum Substrat angebohrt wird. Im Messmikroskop ist ein System konzentrischer Kreise sichtbar, deren Abstand zueinander einen Aufschluss über die jeweiligen Schichtdicken ermöglicht [35]. Der Vorteil dieses Messprinzips besteht darin, dass für die Schichtdickenmessung kein aufwendiges Schliffbild zur Erfassung des Lackaufbaus erforderlich ist. Der Anhang 9.19 zeigt das Messprinzip des Schichtdickenmessgeräts.

4.3 Steinschlagsimulation

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden die Fahrzeuge auf dem VW-Prüfgelände in Ehra unter definierten Bedingungen einer 200 km langen Fahrt auf der Splitterprobungstrecke unterzogen. Der Testzyklus der Splitterprobung bildet den Feldeinsatz über die Fahrzeuglebensdauer nach. Im Nachgang der Splitterprobung wurden die betroffenen Bauteile, wie Schweller, Türen und Seitenwandrahmen –

häufig aus Rapid-Prototyp-Teilen hergestellt – untersucht, um die Schwere der Schäden zu bestimmen. Diese Quantifizierung der Schädigung nach der Splitterprobung diente dann anschließend als Maßstab für die Erweiterung des Simulationstools „Pebbles II“ und sollte dabei helfen, neue Auslegungskriterien für die Steinschlagsimulation zu definieren.

4.3.1 Vergleichsanalyse der Simulationsergebnisse zu realen Schädigungen

Zur Validierung der Simulationsergebnisse und zum Vergleich der realen Schädigungen durch Steinschlag am Fahrzeug mit den in den Fallturmversuchen unter definierten Bedingungen erzeugten Schäden wurden einzelne Einschläge im Kotflügel und Schweller eines Fahrzeugs nach einer 200 km Splitterprobung ausgewertet und miteinander verglichen. Die realen Steinschlagschäden auf den Bauteilen (Kotflügel und Schweller) wurden - basierend auf den Ergebnissen der für das Fahrzeug durchgeführten Steinschlagsimulation - nach ihren Auftreffwinkeln in fünf Bereiche unterteilt. Anschließend wurden jeweils drei Einschläge von jedem Bereich ausgewählt und ausgewertet.

4.3.2 Methodik zur Quantifizierung von Lackschäden durch Steinschlag

Zur Analyse von Steinschlagschäden an Bauteilen gibt es zwei Möglichkeiten. Die erste ist die visuelle Auswertung (optische Analyse) und die zweite ist die digitale Auswertung mittels einer Software. Die Basis beider Methodiken zur Auswertung von Beschädigungen bildet die DIN EN ISO 20567-1 „Beschichtungsstoffe – Prüfung der Steinschlagfestigkeit von Beschichtungen – Teil 1: Multischlagprüfung“ [49].

4.3.2.1 Visuelle Schadensauswertung

Für die visuelle Auswertung wurde der Schweller in Sektoren von 100 x 100 mm eingeteilt. Bei den Schwellern gibt es zusätzlich konturbedingte Schädigungsflächen wie Oberkante, Unterkante und Hauptfläche, die auch in die Sektoren eingeteilt wurden. Zur Beurteilung der Schädigung wurden die Sektoren nacheinander einzeln betrachtet und mit den Referenzmustern (Anhang 9.23) verglichen. Abhängig vom Grad der Schädigung ergibt sich ein Kennwert zwischen 0,0 und 5,0, abgestuft in 0,5er Schritten. In der DIN EN ISO 20567-1 (2006) ist ein Schaden wie folgt definiert: „Ein Schaden, der in die Auswertung einbezogen wird, liegt dann vor, wenn die Beschichtung, egal in welcher Schicht, enthaftet und abgeplatzt ist. Bei

Kunststoffsubstraten tritt häufig anstelle der Abplatzung eine Verschiebung der obersten Schicht, verbunden mit der Freilegung der darunterliegenden Schichten, auf. Auch dies wird als Schädigung betrachtet und fließt in die Beurteilung ein. Kratzer oder Markierungen, die z.B. auf Grund von Eindrücken durch das Beschussmaterial entstanden sind, zählen nicht zur geschädigten Fläche [49, S. 9].“ Auf Basis dieser Festlegung kann eine visuelle Auswertung durchgeführt werden. Jedoch liefert die visuelle Auswertung nur ein subjektives Ergebnis, da die Bewertung primär durch das menschliche Auge bestimmt wird. Um eine objektive Analyse mit reproduzierbaren Analysen generieren zu können, bedient man sich der zweiten Methodik, welche die digitale Auswertung mit einem Bildbearbeitungsprogramm verwendet.

4.3.2.2 Digitale Schadensauswertung

Die digitale Oberflächenbewertung erfolgte mit dem Bildbearbeitungsprogramm GIMP (GNU Image Manipulation Program). Sie ermöglicht eine quantitative Erfassung der Oberflächenschädigung und liefert im Vergleich zur visuellen Methode objektive und reproduzierbare Ergebnisse. Für die digitale Auswertung wird das Bauteil (z.B. ein Schweller) zunächst fotografiert. Da die ganze Analyse auf den Bildern dieser Bauteile basiert, müssen die Aufnahmen immer unter den gleichen Bedingungen entstehen, um reproduzierbare Ergebnisse erzielen zu können. Die Bauteile müssen vor der Aufnahme gereinigt werden, da Verunreinigungen in der Auswertung als Schädigungen wahrgenommen werden könnten. Die Bilder der in dieser Arbeit ausgewerteten Bauteile wurden daher in der Fotoabteilung der AUDI AG aufgenommen, da aufgrund der glänzenden und reflektierenden Lackierung die Bildaufnahme ohne Spiegelung und Schatten sehr schwierig ist.

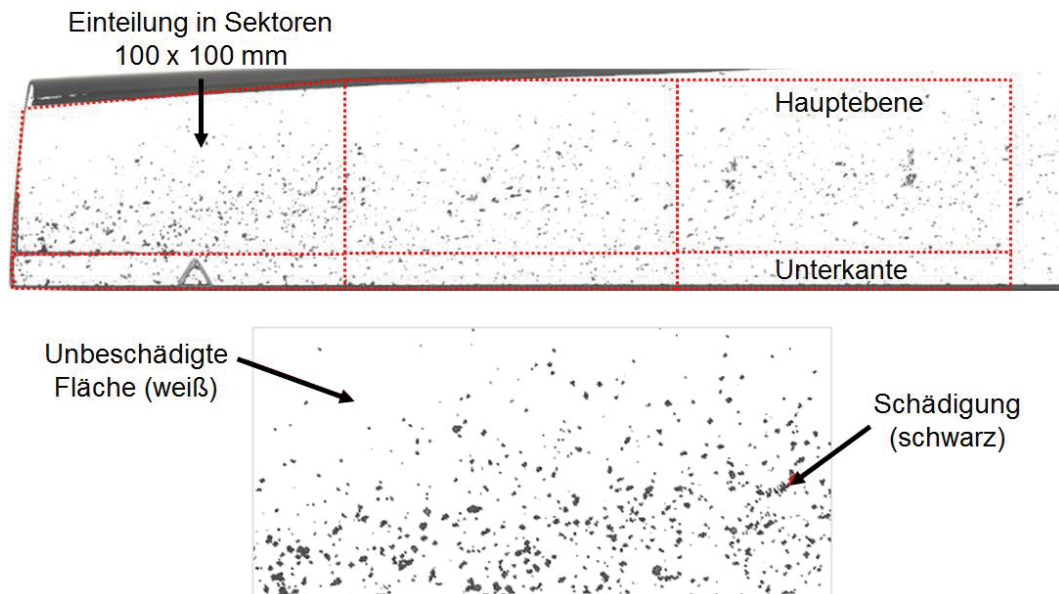


Abbildung 4.16: Binärbild eines Fahrzeugschwellers nach der digitalen Auswertung mit GIMP, eingeteilt in Sektoren. Die Schädigung ist in schwarz und die unbeschädigte Oberfläche in weiß dargestellt.

Für die digitale Auswertung der Schädigung ist die Einteilung in Sektoren von 100 x 100 mm analog der visuellen Auswertung notwendig, da diese Einteilung den Vergleich mit der Simulation erleichtert (Abbildung 4.16). Um möglichst ebene Fläche zur Auswertung zu erzeugen, muss die Geometrie in den Sektoren individuell betrachtet werden. Für die Auswertung wurde das Schädigungsbild in das Bildbearbeitungsprogramm geladen und aus einem digitalen Farbbild ein Schwarzweißbild erstellt. Anschließend wurde das Bild mittels eines Schwellwertfilters, durch die Einstellung auf den Wert 70 (experimentell bestimmter Wert in GIMP), in ein Binärbild umgewandelt. Bei einem Binärbild wird jedem Pixel eine 0 oder 1 zugeordnet. Der geschädigte Teil der Fläche ist in schwarz dargestellt und entspricht dem Binärwert von 0 und die unbeschädigte Oberfläche entspricht dem Binärwert von 1 und ist in weiß dargestellt. Der prozentuale Anteil der geschädigten Fläche (Sektoren) wird durch den folgenden Zusammenhang berechnet:

$$X_{A_{\text{geschädigt}}} = \frac{100 \times A_{\text{geschädigt}}}{A_{\text{gesamt}}} \quad (4.3)$$

Der Vorgang der gesamten Analyse von der Bilderfassung bis hin zur Berechnung des Anteils geschädigter Fläche ist in der DIN EN ISO 21227-1:2003 „Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden mittels digitaler Bildverarbeitung – Teil 1:

Allgemeine Anleitung“ [52] erläutert. Mit diesen Daten wurde anschließend die Kennwertklasse anhand der folgenden Tabelle 4.10 bestimmt.

Tabelle 4.10: Zuordnung der Kennwerte zur prozentualen Schädigungsfläche [49]

Geschädigte Fläche in %	Kennwert
0,0 – 0	0,0
0,0 – 0,2	0,5
0,2 – 1,0	1,0
1,0 – 2,5	1,5
2,5 – 5,5	2,0
5,5 – 10,7	2,5
10,7 – 19,2	3,0
19,2 – 29,0	3,5
29,0 – 43,8	4,0
43,8 – 58,3	4,5
58,3 – 81,3	5,0

5 Auswertung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Aufnahmen der Versuchsfahrten ausgewertet und die Schädigungen aus den Fallturmversuchen dargestellt. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 5.1 und 5.2 behandelt. Zu Beginn der einzelnen Kapitel wird jeweils die Methodik zur Auswertung und die Hintergründe für die Darstellung beschrieben. Zum Schluss werden die Ergebnisse mit den verschiedenen Parametereinstellungen analysiert und miteinander verglichen. Die Zusammenführung der Ergebnisse aus den Versuchsfahrten und den Fallturmversuchen erfolgt Kapitel 5.3 „Schädigungsanalyse für die Steinschlagsimulation“.

5.1 Ergebnisse des Steinabwurfs

5.1.1 Ergebnisse der Versuchsfahrten mit ortsfesten Kamerasystem

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach den verschiedenen Fahrzuständen geordnet. Für jeden Fahrzustand wurde das Abwurfprofil in Längsrichtung des Fahrzeugs bestimmt und die Darstellung der Häufigkeit schadenswirksamer Steine mit der Unterteilung in die Steingrößen vorgenommen. Zudem wurden drei Reifenarten (Winter-, Sommer-, und profillose Reifen) mit verschiedenen Reifeninnendrücken berücksichtigt. Der detaillierte Versuchsplan mit den Versuchsparametern und die Auswertungen der einzelnen Versuche sind im Anhang 9.32 zu finden.

5.1.1.1 Versuchsreihe: Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Für die Untersuchungen des Steinabwurfes wurden in der ersten Versuchsreihe Fahrversuche bei konstanter Fahrt mit Fahrgeschwindigkeiten von 40 und 80 km/h durchgeführt. Die Geschwindigkeit wurde vom Testfahrer über die Geschwindigkeitsregelungsanlage (Tempomat) des Fahrzeugs möglichst genau eingehalten und mit der Videoanalyse bzw. dem Datenlogger geprüft.

In der folgenden Abbildung 5.1 ist das Abwurfprofil mit der Häufigkeitsverteilung der Steine bei einer Messung mit dem ortsfesten Kamerasystem, einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h mit Sommerbereifung und einem Reifeninnendruck von 2,1 bar dargestellt. Im Bereich zwischen 500 bis 1000 mm in x-Richtung und 100 bis 150 mm in z-Richtung ist ein deutliches Maximum der Verteilung (rot markierter Bereich) zu erkennen. Durchschnittlich 50 % der Steine bleiben dabei unter 200 mm

in z-Richtung. Das bedeutet, dass die Anzahl der Steine proportional zur Fahrzeughöhe (in z-Richtung) abnimmt. Zusätzlich zeigt die Abbildung die normierte Darstellung des Abwurfprofils. Wird der Bereich mit der höchsten Häufigkeit auf 100 normiert, so erhält man eine prozentuale Verteilung über das Abwurfprofil. In der folgenden Tabelle 5.1. wird die Anzahl der detektierten Steine einer Versuchsreihe, eingeteilt in Steinkategorie (Tabelle 4.3 Seite 39) zur Flughöhe der Steine dargestellt. Aus 11 Versuchsfahrten wurden 31 Steine unter Berücksichtigung der Kriterien zur Steinauswahl detektiert.

Tabelle 5.1: Anzahl der Steine einer Versuchsreihe mit 11 Versuchsfahrten: Fahrsituation: konstante Fahrt mit 40 km/h; Bereifung: Sommerreifen mit 2,1 bar

Steinflughöhe in z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
300 – 400	6	5	1	0	0
250 – 299	5	0	3	2	0
200 – 249	3	2	1	0	0
150 – 199	7	1	3	3	0
100 – 149	10	2	3	5	0
Gesamt Anzahl	31				

Fahrtrichtung

(1) z-Richtung in mm	>350	0	0	4	2	0	0
	>300	0	0	4	2	2	2
	>250	0	4	6	7	5	5
	>200	0	7	9	7	3	3
	>150	0	14	14	9	8	7
	>100	7	28	16	11	11	12
	0	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

(2) z-Richtung in mm	>350	0	0	14	7	0	0
	>300	0	0	14	7	7	7
	>250	0	14	21	25	18	18
	>200	0	25	32	25	11	11
	>150	0	50	50	32	29	25
	>100	25	100	57	39	39	43
	0	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Abbildung 5.1: Darstellung des Abwurfprofils (1) und normiertes Abwurfprofil (2) Ergebnisdarstellung der Steinflugbahn im fahrzeugfesten Bezugssystem. Versuchsreihe mit 11 Versuchsfahrten und 31 Flugbahnen von Steinen bei konstanter Fahrt mit 40 km/h; Sommerreifen mit 2,1 bar. Der rot markierte Bereich stellt mit 100 das Maximum mit 28 Steinen dar.

Das Ergebnis der Auswertungen für die Fahrgeschwindigkeit 80 km/h werden in Form des Abwurfprofils und der Anzahl wirksamer Steine in Tabelle 5.2 und Abbildung 5.2 dargestellt. Bei 11 Versuchsfahrten wurden hier 80 Steine erfasst. Aus diesen Ergebnissen lässt sich eine Aussage über die Häufigkeit der detektierten Steine bei höherer Fahrgeschwindigkeit generieren. Die Änderung der geometrischen Verteilung ist auf die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zurückzuführen. Bei den Steinflugbahnen im raumfesten Bezugssystem war ein nahezu vertikales Aufsteigen der Steine zu beobachten. Das Fahrzeug fährt dabei mit gegebener Fahrgeschwindigkeit gegen die vertikal aufsteigenden Steine (siehe Abbildung 4.5, Kapitel 4.1.1.4).

Tabelle 5.2: Anzahl der Steine einer Versuchsreihe mit 11 Versuchsfahrten: Fahrsituation: konstante Fahrt mit 80 km/h; Bereifung: Sommerreifen mit 2,1 bar

Steinflughöhe in z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
300 – 400	14	6	7	1	0
250 – 299	6	3	2	1	0
200 – 249	11	3	5	3	0
150 – 199	15	0	10	5	0
100 – 149	34	2	16	16	0
Gesamt Anzahl	80				

 **Fahrtrichtung**

z-Richtung in mm	x-Richtung in mm						
	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000	
>350	0	0	3	2	4	6	
>300	0	1	3	6	7	7	
>250	0	3	5	10	9	9	
>200	0	4	9	14	13	15	
>150	1	10	17	21	23	20	
>100	3	23	41	49	44	38	
0	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000	

(1)

z-Richtung in mm	x-Richtung in mm						
	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000	
>350	0	0	6	4	8	12	
>300	0	2	6	12	14	14	
>250	0	6	10	20	18	18	
>200	0	8	18	29	27	31	
>150	2	20	35	43	47	41	
>100	6	47	84	100	90	78	
0	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000	

(2)

Abbildung 5.2: Darstellung des Abwurfprofils (1) und Normierung (2): Versuchsreihe mit 11 Versuchsfahrten und 80 Steinen bei konstanter Fahrt mit 80 km/h; Sommerreifen mit 2,1 bar. Der rot markierte Bereich stellt mit 100 das Maximum mit 49 Steinen dar.

Die Fahrgeschwindigkeit hat einen Einfluss auf das Abwurfprofil in der Längsrichtung des Fahrzeugs. Die Parameter Reifeninnendruck und Reifenart haben hingegen einen Einfluss auf die Anzahl der Steine im Auswertungsbereich. Aus diesem Grund wird aus der Gesamtanzahl der Steine pro Fahrzustand ein durchschnittlicher Wert pro Versuch gebildet. In der folgenden Abbildung 5.3 ist die Anzahl der detektierten Steine pro Versuch über dem Reifeninnendruck bei Winter-, Sommer- und profillosen Reifen (Slicks) jeweils für 40 und 80 km/h aufgetragen. Bei den Versuchen mit Sommerreifen für 40 und 80 km/h bei 2,1 bar werden jeweils 5 Versuche in die Auswertungen mit einbezogen. Bei den Sommerreifen steigt die Anzahl der Steine mit der Verringerung des Reifeninnendrucks. Das Ergebnis verdeutlicht, dass bei höherer Fahrgeschwindigkeit die Anzahl der detektierten Steine pro Versuch zunimmt. Bei Sommerreifen mit einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h liegt die Steinanzahl beispielsweise im Durchschnitt bei 0,5 Steinen pro Versuch und bei 80 km/h hingegen liegt der durchschnittliche Wert bei 2 Steinen pro Versuch. Bei den profillosen Reifen ist analog den Sommerreifen bei abnehmendem Reifeninnendruck eine steigende Anzahl der detektierten Steine pro Versuch festzustellen. Bei der Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h und einem Reifeninnendruck von 2,1 bar ist der kleinste Wert der Steinanzahl pro Versuch festzustellen. Bei den Winterreifen hingegen wird bei einem Reifendruck von 2,3 bar (dem empfohlenen Reifeninnendruck des Reifenherstellers) eine Erhöhung der Anzahl der detektierten Steine pro Versuch festgestellt. Des Weiteren ist bei den Winterreifen die Zunahme der Anzahl der Steine bei 1,5 bar und 3,5 bar gegenüber den Werten bei Sommerreifen erheblich. Beim Vergleich mit den Sommerreifen verdoppeln sich die Werte bei den Winterreifen und den profillosen Reifen. Infolgedessen lässt sich die Reifenart als signifikanter einflussreicher Parameter identifizieren.

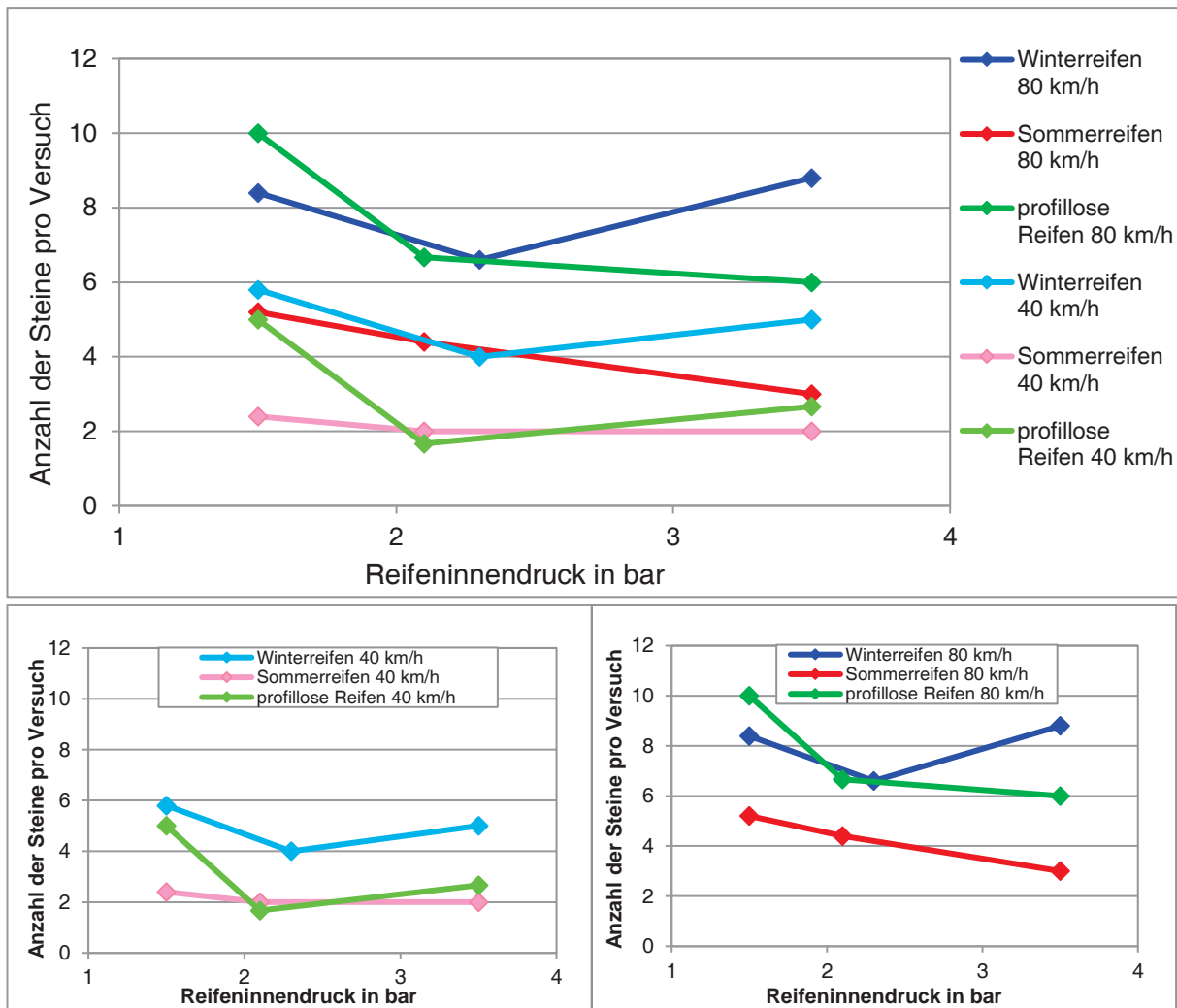


Abbildung 5.3: Anzahl der Steine pro Versuch über den Reifeninnendruck für Winter-Sommer- und profillose Reifen bei konstanter Fahrt mit 40 und 80 km/h

Zusätzlich wird die Einflussgröße Reifenschlupf, die nach Schönberger [10] den Abwurfwinkel der Steine im Wesentlichen beeinflusst, untersucht. Mithilfe der Aufzeichnung des Datenloggers erfolgt die Überprüfung aus den Daten des ESP Raddrehzahlgeschwindigkeit und der GPS Fahrzeuggeschwindigkeit. Als Beispiel wird die Versuchsfahrt 037 (konstante Fahrt bei 80 km/h mit Sommerreifen bei einem Reifeninnendruck von 2,1 bar) analysiert. In der Abbildung 5.4 sind die zwei Geschwindigkeiten des rechten Vorderrades des Fahrzeuges visualisiert. Bedingt durch eine fehlende Synchronisation zwischen den Aufnahmen der High-Speed-Kamera und der Aufzeichnung des Datenloggers wird die Untersuchung des Reifenschlupfes auf einen Zeitbereich von 2,5 Sekunden ausgedehnt. In Abbildung 5.5 ist der mittels der Gleichung 2.13 errechnete Schlupf abgebildet. Aus dem Verlauf der Kurve ist ein Wertebereich von 0 bis 2 % für den Reifenschlupf zu erkennen.

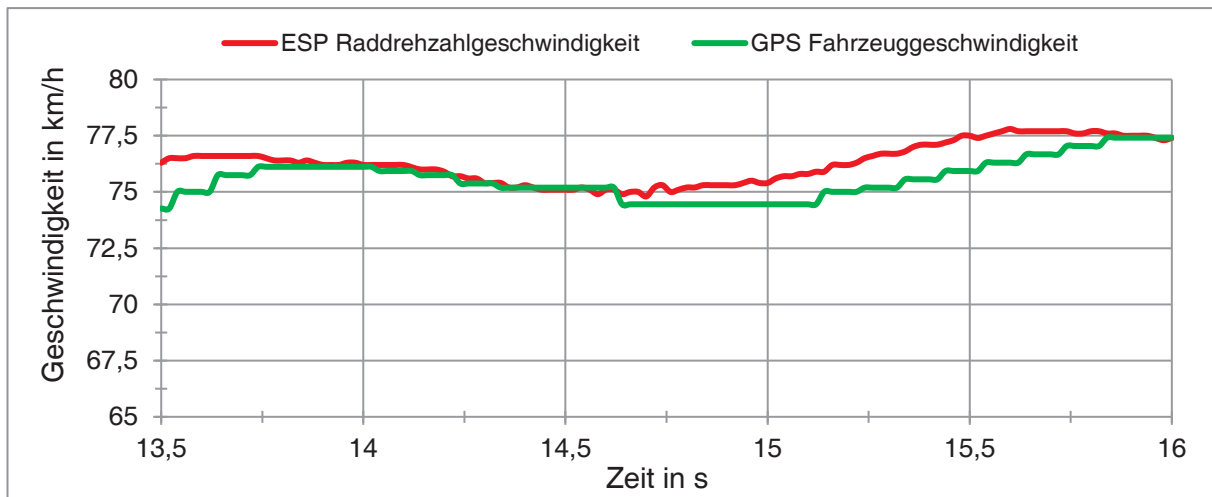


Abbildung 5.4: Einflussgröße Reifenschlupf: Daten werden mithilfe der ESP Raddrehzahlgeschwindigkeit und der GPS Fahrzeuggeschwindigkeit aus den Aufzeichnungen des Datenloggers überprüft. (Versuch 37)



Abbildung 5.5: Darstellung des Reifenschlupfes als Funktion der Zeit. (Versuch 37)

Neben den Positionskordinaten der Steine wurden zudem die Steingeschwindigkeiten und die daraus folgenden Abwurfwinkel analysiert. Zur Charakterisierung wurde die Steingeschwindigkeit in ihre Komponenten in x- und z-Richtung aufgeteilt. Die Steingeschwindigkeit wird immer an der gleichen x-Position (Abbildung 4.4, Kapitel 4.1.1.1) gemessen, um die Abweichung der Erfassung der High-Speed-Aufnahmen zu kompensieren. In den folgenden beiden Abbildungen 5.6 und 5.7 ist die Fahrgeschwindigkeit über den Steingeschwindigkeiten im raumfesten Bezugssystem aufgetragen. Für die Darstellung sind alle Ergebnisse der Versuchsreihe mit konstanter Fahrt berücksichtigt.

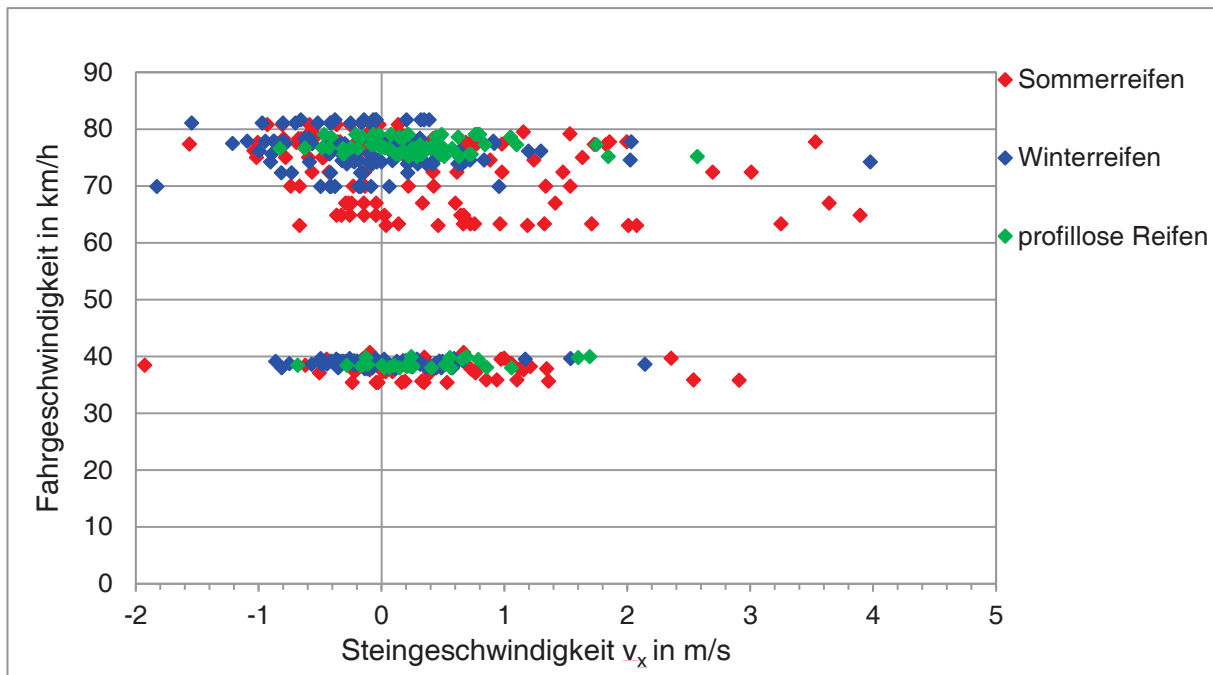


Abbildung 5.6: Darstellung der Steingeschwindigkeiten in x-Richtung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit 40 und 80 km/h, bei konstanter Fahrt. Hierbei sind die Flugbahnen in Abhängigkeit der Bereifung, Sommerreifen (rot), Winterreifen (blau) und profillosen Reifen (grün) unterteilt.

Die Steingeschwindigkeiten in x-Richtung liegen im Durchschnitt bei ca. 1 m/s. In Einzelfällen kann die Geschwindigkeit der Steine bis zu 4 m/s betragen. Positive Steingeschwindigkeiten im raumfesten Bezugssystem stellen im fahrzeugfesten Bezugssystem zum Fahrzeug eine Bewegung in Fahrtrichtung dar. Bis auf wenige Ausnahmen ist gegen die Fahrtrichtung keine große Streuung wahrzunehmen. Insgesamt fliegen etwa ein Drittel der Steine gegen die Fahrtrichtung und zwei Drittel in Fahrtrichtung.

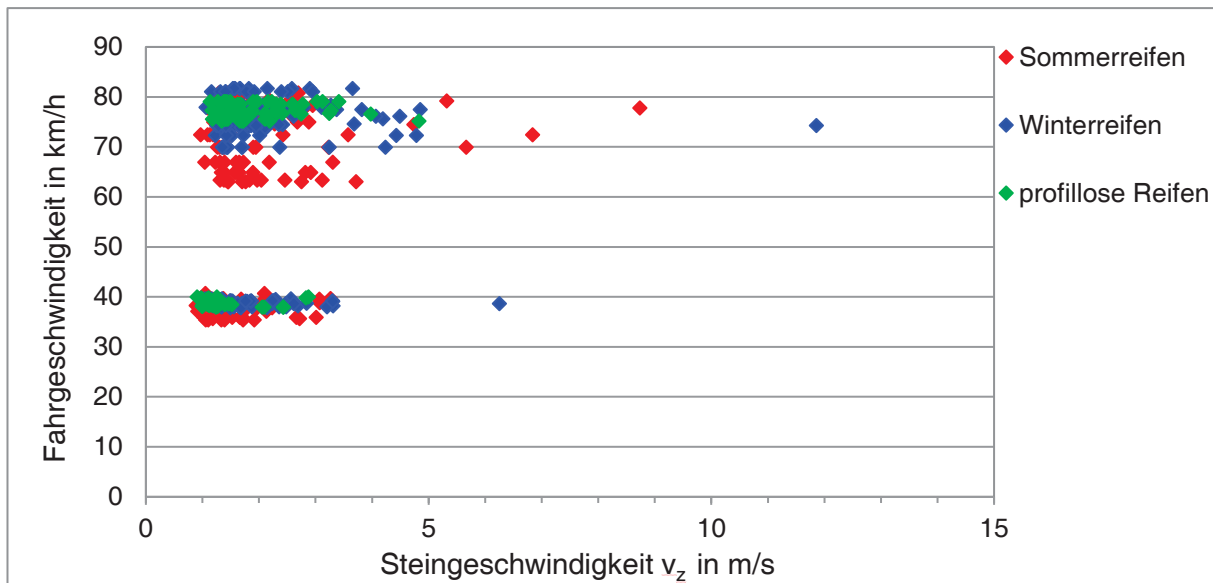


Abbildung 5.7: Darstellung der Steingeschwindigkeit in z-Richtung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit bei 40 und 80 km/h, bei konstanter Fahrt

Bei den Steingeschwindigkeiten in z-Richtung liegen 80 % zwischen 1 und 2,5 m/s. Bei 80 km/h Fahrgeschwindigkeit treten Steingeschwindigkeit bis zu 9 m/s auf, die maximale Steingeschwindigkeit bei 40 km/h liegt hingegen bei 6 m/s.

Aus den Geschwindigkeiten wird der Abwurfwinkel der Steine im raumfesten Bezugssystem mithilfe der Gleichung (2.11) errechnet. In dem berechneten Abwurfwinkel ist eine gewisse Ungenauigkeit enthalten. Jedoch resultiert diese Ungenauigkeit aus den gemessenen Daten der Aufnahmen, da ein genauer Abwurfpunkt des Steins durch Schattenbildung nicht klar zu identifizieren ist (siehe Abbildung 4.4, Kapitel 4.1.1.1).

5.1.1.2 Versuchsreihe: Beschleunigung

Es werden zwei Fahrsituationen betrachtet: A) „Anfahren“ und B) „Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h“. Beim Anfahren wird die Motordrehzahl im Stand auf 2500 Umdrehungen pro Minute gehalten, dann die Kupplung schlagartig gelöst und gleichzeitig mit maximalem Antriebsmoment beschleunigt. In den nachfolgenden Abbildungen 5.8 werden die Abwurfprofile für das Anfahren mit Sommerreifen bei unterschiedlichem Reifeninnendruck gezeigt. Die Abwurfprofile zeigen, dass bei niedrigem Reifeninnendruck die Wurfweite der Steine in x-Richtung des Fahrzeugs im Bereich < 1500 mm zunimmt. Die Abwurfprofile der Winter- und profillosen Reifen sind im Anhang 9.25 - 9.31 dargestellt.

In der Abbildung 5.9 „Auswertung der Ergebnisse aus den Abwurfprofilen“ ist die Anzahl der Steine pro Versuch über dem Reifeninnendruck bei Winter-, Sommer- und profillosen Reifen aufgetragen. Bei den Winterreifen und profillosen Reifen ist bei Verringerung des Reifeninnendruck eine steigende Anzahl der Steine pro Versuch festzustellen. Bei den Sommerreifen hingegen wird bei der Abweichung des empfohlenen Reifeninnendruck von 2,1 bar eine Erhöhung der Steinanzahl pro Versuch identifiziert und im Vergleich zu den Winterreifen ist eine erhebliche Zunahme der Steinanzahl pro Versuch bei 1,5 bar und 3,5 bar zu erkennen. Bei der Gegenüberstellung der Sommerreifen mit den profillosen Reifen ist nur bei einem Reifeninnendruck von 2,1 bar ein Unterschied zu erkennen.

← Fahrtrichtung

z-Richtung in mm	<400	1	2	1	0	0	0
	<350	3	4	2	0	0	0
	<300	7	6	4	0	0	0
	<250	19	12	4	0	0	0
	<200	29	22	5	0	0	0
	<150	45	30	5	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(1)							
z-Richtung in mm	<400	1	1	0	0	0	0
	<350	1	1	0	0	0	0
	<300	3	3	0	0	0	0
	<250	10	9	0	0	0	0
	<200	19	14	1	0	0	0
	<150	25	19	4	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(2)							
z-Richtung in mm	<400	2	2	0	0	0	0
	<350	3	3	0	0	0	0
	<300	6	6	0	0	0	0
	<250	12	12	0	0	0	0
	<200	21	14	0	0	0	0
	<150	32	21	0	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(3)	x-Richtung in mm						

Abbildung 5.8: Darstellung des Abwurfprofils: Anfahren; Sommerreifen: (1) Versuchsreihe mit 5 Versuchsfahrten, einen Reifeninnendruck von 1,5 bar und 45 ausgewerteten Steinflugbahnen, (2) Reifendruck von 2,1 bar mit 25 Steinflugbahnen bei 5 Versuchsfahrten, (3) Reifeninnendruck von 3,5 bar mit 32 Steinflugbahnen bei 5 Versuchsfahrten. Der rot markierte Bereich stellt das Maximum von 100% dar.

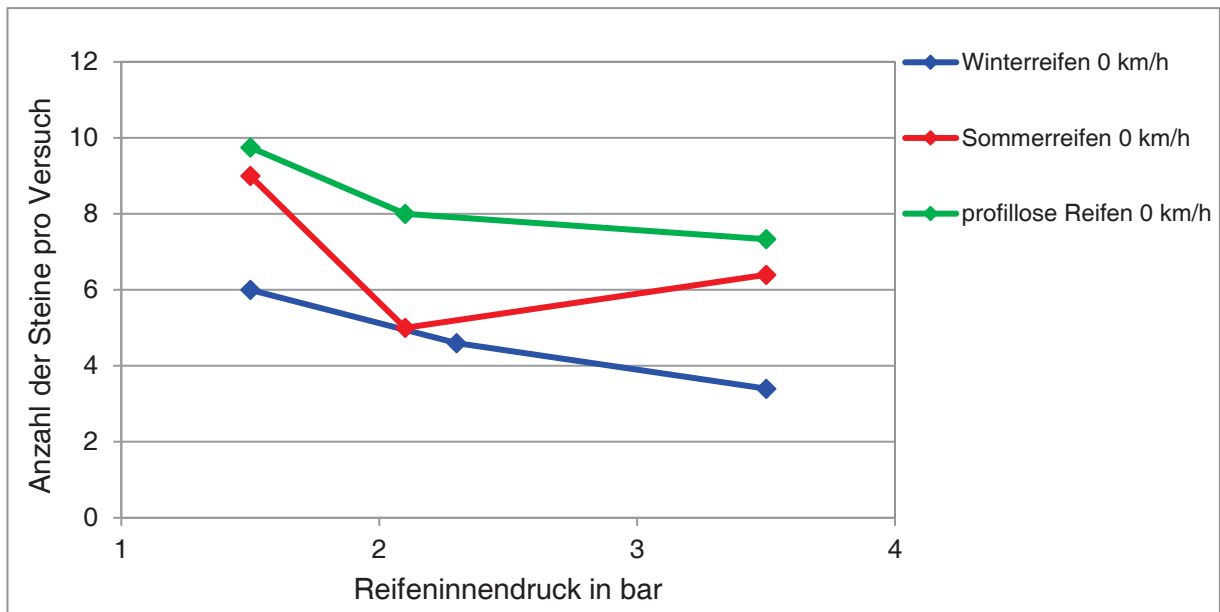


Abbildung 5.9: Anzahl der Steine pro Versuch über Reifeninnendruck für Winter-, Sommer- und profillosen Reifen beim Anfahren

In der Versuchsreihe „Beschleunigung“ werden die Steine gegen Fahrtrichtung abgeworfen: Je höher der Abwurfpunkt, umso kleiner der Abwurfwinkel. In der folgenden Abbildung 5.10 sind die Daten zum Reifenschlupf dargestellt. Als Beispiel wird die Versuchsfahrt 040 (Anfahren mit Sommerreifen und 2,1 bar Reifendruck) analysiert.

Der Reifenschlupf besitzt zu Beginn der Messung den Wert von 100 % (Abbildung 5.11); dies bedeutet, dass das Fahrzeug steht und sich das Rad dreht. Die Steine lösen sich erst mit einer Verzögerung von einer halben Sekunde nach Start des Versuchs und befinden sich daher beim Steinabwurf nicht mehr bei 100 % sondern bereits bei 85 % des Reifenschlupfes (Abbildung 5.11).

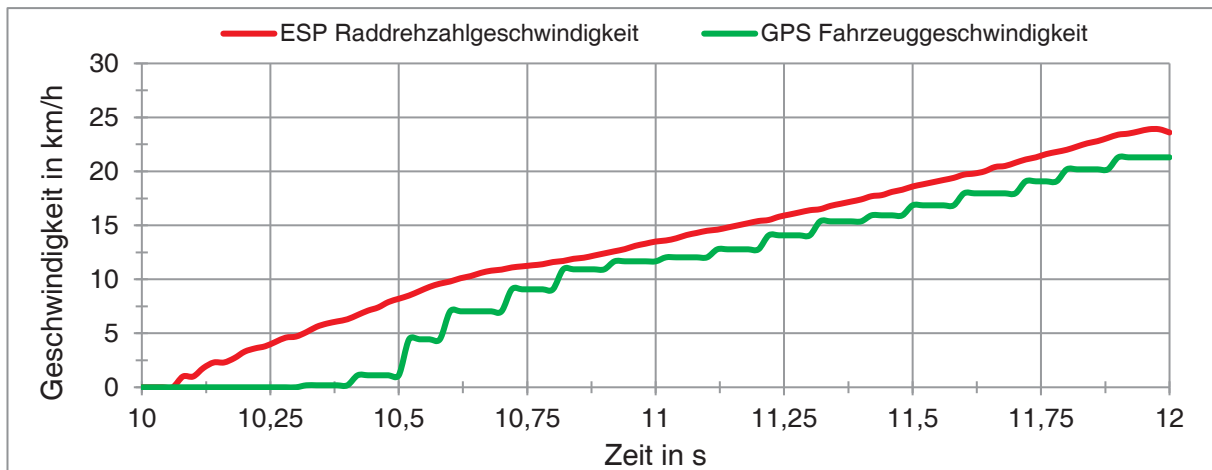


Abbildung 5.10: Untersuchungsmethode Reifenschlupf: Daten werden mithilfe der ESP Raddrehzahlgeschwindigkeit und der GPS Fahrzeuggeschwindigkeit aus der Aufzeichnung des Datenloggers überprüft. (Versuch 40)

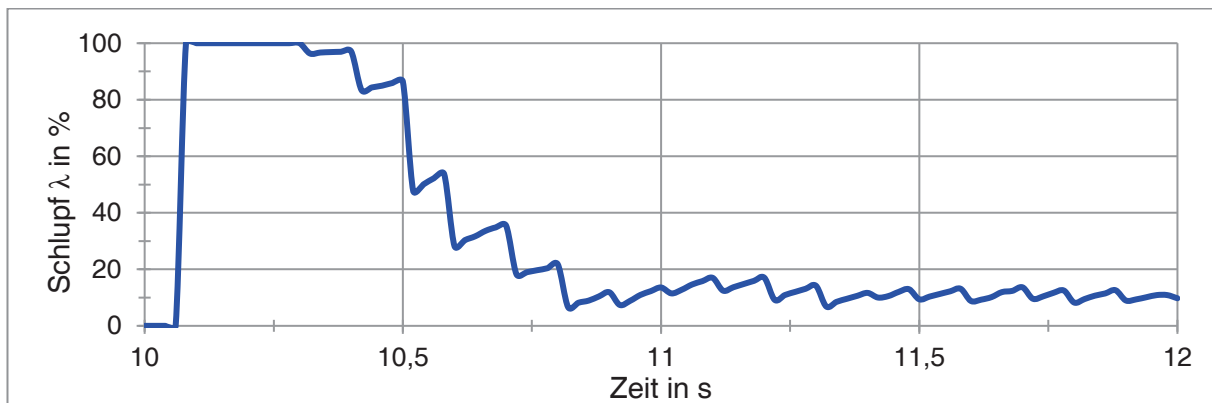


Abbildung 5.11: Darstellung des Reifenschlupfes als Funktion der Zeit. (Versuch 40)

Bei der Versuchsreihe „Beschleunigung von 40 km/h“ wird mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h bei einem Markierungsstreifen (15 m vor dem Versuchsaufbau) mit maximalem Antriebsmoment beschleunigt. Ein vorzeitiges Beschleunigen ist durch das verzögerte Ansprechverhalten des Motors notwendig. Die Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h wird in der folgenden Abbildung 5.12 in Form von Abwurfprofilen bei verschiedenen Reifeninnendrucken und Sommerreifen dargestellt. Die Abwurfprofile unterscheiden sich besonders in der Abwurfhöhe, zu einem kleinen Teil ist eine Verschiebung in x-Richtung zu erkennen. Je höher der Reifeninnendruck bei den Sommerreifen ist, desto mehr Steine werden abgeworfen. Das Abwurfprofil bei 3,5 bar Reifeninnendruck zeigt ein höheres Steinschlagpotenzial (vergrößerte Wahrscheinlichkeit von einem Stein getroffen zu werden) als bei 2,1 und 1,5 bar Reifeninnendruck.



Fahrtrichtung

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	0
	<350	0	0	0	0	0	1
	<300	0	0	0	1	1	1
	<250	0	0	1	2	2	3
	<200	0	1	3	4	4	3
	<150	0	4	12	15	14	12
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(1)							
z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	1	1
	<350	0	0	0	1	1	1
	<300	0	0	1	2	1	0
	<250	0	0	2	2	4	5
	<200	0	1	5	9	11	8
	<150	0	11	26	28	23	20
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(2)							
z-Richtung in mm	<400	0	1	1	1	2	1
	<350	0	1	0	3	2	1
	<300	0	1	3	4	3	3
	<250	0	2	4	2	2	2
	<200	1	4	6	13	15	15
	<150	2	14	31	31	23	20
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(3)	x-Richtung in mm						

Abbildung 5.12: Darstellung des Abwurfprofils: Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h; Sommerreifen: (1) Reifeninnendruck von 1,5 bar und 19 ausgewertete Steinflugbahnen bei 5 Versuchsfahrten, (2) Reifeninnendruck von 2,1 bar mit 34 Steinflugbahnen bei 5 Versuchsfahrten, (3) Reifeninnendruck von 3,5 bar mit 42 Steinflugbahnen bei 5 Versuchsfahrten. Der rot markierte Bereich stellt das Maximum von 100% dar.

In der Abbildung 5.13 ist der Einfluss der Reifenarten Winter-, Sommer- und profillosen Reifen bei einem Reifeninnendruck (Normaldruck) von 2,1 bar bzw. 2,3 bar bei Winterreifen in den Abwurfprofilen dargestellt. Die Unterscheidung der Abwurfprofile bei den drei Reifenarten liegt in der Abwurfhöhe und in der Verschiebung in x-Richtung. Der Winterreifen zeigt ein hohes Steinschlagpotenzial im Vergleich zu Sommer- und profillosen Reifen, da die Steinflugbahnen große Teile des Messbereiches des Abwurfprofils durchqueren.



Fahrtrichtung

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	2	2	1
	<350	0	0	0	2	1	0
	<300	0	0	2	2	2	4
	<250	0	2	3	5	5	4
	<200	0	3	6	9	9	11
	<150	0	11	28	30	27	22
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(1)							
z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	1	1
	<350	0	0	0	1	1	1
	<300	0	0	1	2	1	0
	<250	0	0	2	2	4	5
	<200	0	1	5	9	11	8
	<150	0	11	26	28	23	20
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(2)							
z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	0
	<350	0	0	0	0	0	0
	<300	0	0	0	0	0	0
	<250	0	0	0	0	0	0
	<200	0	0	0	1	2	2
	<150	0	1	5	11	10	11
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
(3)	x-Richtung in mm						

Abbildung 5.13: Darstellung des Abwurfprofils: Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h; (1) Winterreifen Reifeninnendruck von 2,3 bar und 40 Steinflugbahnen aus 5 Versuchsfahrten, (2) Sommerreifen bei 2,1 bar mit 34 Steinflugbahnen, (3) profillose Reifen bei 2,1 bar mit 11 Steinflugbahnen.

In der folgenden Abbildung 5.14 werden die Ergebnisse aus den Abwurfprofilen, die Anzahl der Steine pro Versuch über dem Reifeninnendruck bei Winter-, Sommer- und profillosen Reifen aufgetragen. Der profillose Reifen zeigt ein ähnliches Verhalten wie bei den anderen Fahrzuständen, da die Anzahl der Steine pro Versuch über den Reifeninnendruck abnimmt. Der Sommerreifen zeigt hingegen eine gegensätzliche Reaktion auf die Änderung des Reifeninnendrucks. Im Vergleich von 1,5 bar zu 3,5 bar verdoppelt sich die Anzahl der Steine pro Versuch beim Sommerreifen. Bei den Sommer- und Winterreifen nimmt die Anzahl der Steine pro Versuch mit Zunahme des Reifeninnendrucks zu, nur dass der Winterreifen im Vergleich zu den anderen beiden Reifentypen insgesamt mehr Steine abwirft, was bereits in der Gegenüberstellung der Abwurfprofile (oben) deutlich wurde.

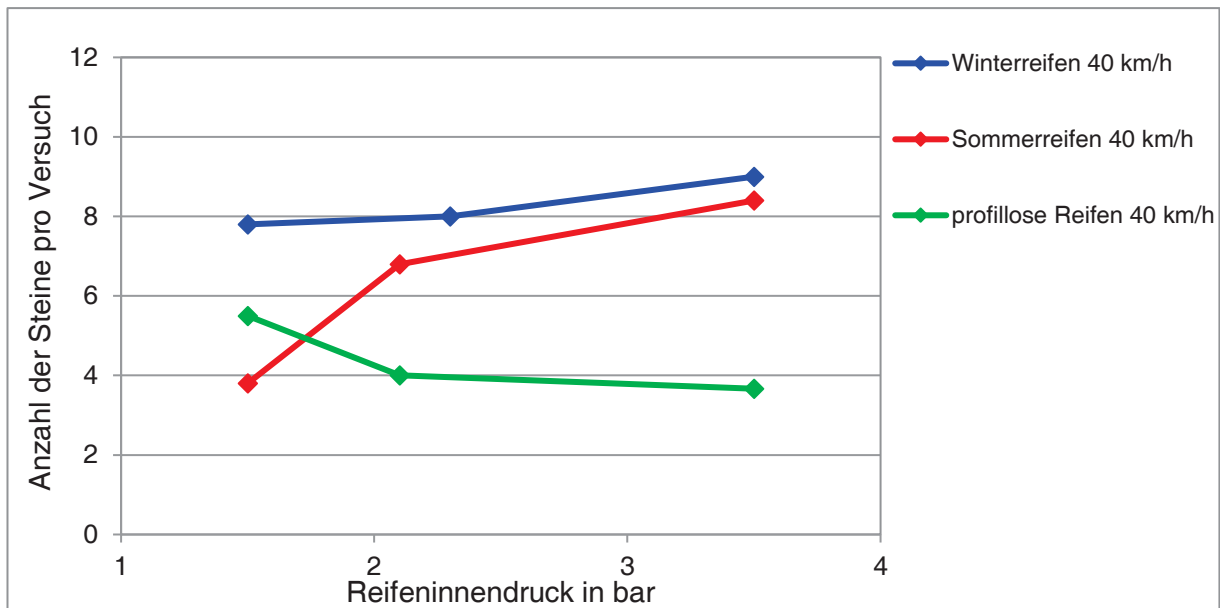


Abbildung 5.14: Anzahl der Steine pro Versuch über Reifeninnendruck für Winter-, Sommer- und profillosen Reifen bei Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h

Des Weiteren wird der Reifenschlupf bei Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h erfasst. In der folgenden Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 sind die Daten zum Reifenschlupf dargestellt. Als Beispiel wird die Versuchsfahrt 074 (Beschleunigung von 40 km/h mit Sommerreifen und 2,1 bar Reifendruck) analysiert. Die Diagramme stellen zur Übersichtlichkeit einen Zeitbereich von dreieinhalb Sekunden dar. Dafür wird bis zu der Zeit von 6,5 s eine Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h konstant eingehalten. Ab 6,5 s wird mit maximalem Antriebsmoment beschleunigt, und der Zeitbereich der Überfahrt wird in den Wertebereich von 7,5 s und 8,5 s eingeordnet. Dabei stellt sich ca. 1 s nach der Betätigung des Gaspedals eine konstante Beschleunigung ein. Der Reifenschlupf pendelt sich dann zwischen 4 % und 7 % ein. Durch die niedrige Taktfrequenz des GPS-Empfängers kommt es bei der Erfassung des Reifenschlupfes zu dieser starken Abweichung.

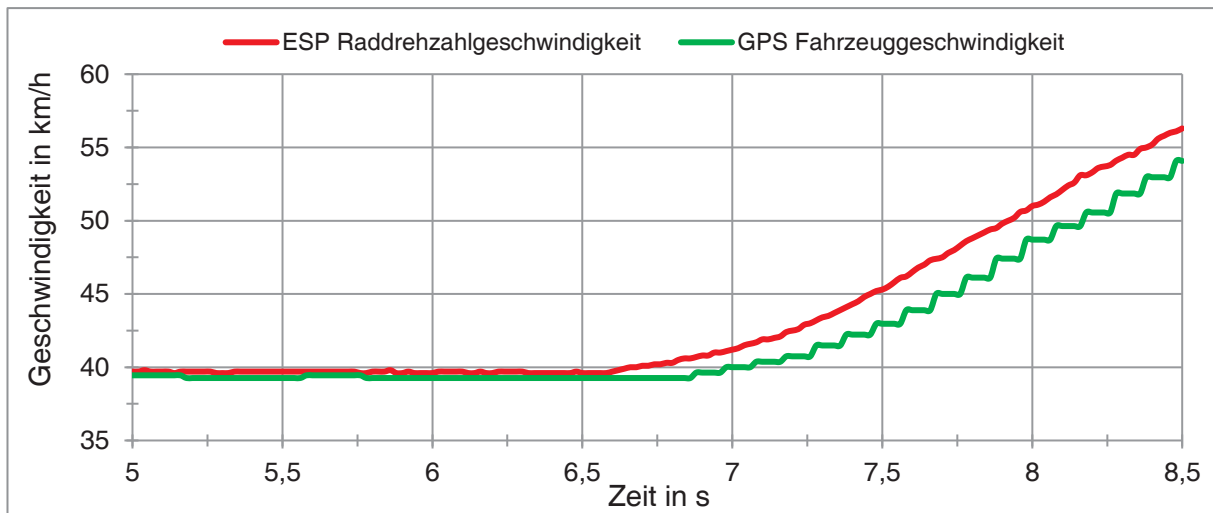


Abbildung 5.15: Untersuchungsmethode Reifenschlupf: Daten werden mithilfe der ESP Raddrehzahlgeschwindigkeit und der GPS Fahrzeuggeschwindigkeit aus der Aufzeichnung des Datenloggers überprüft. (Versuch 74)

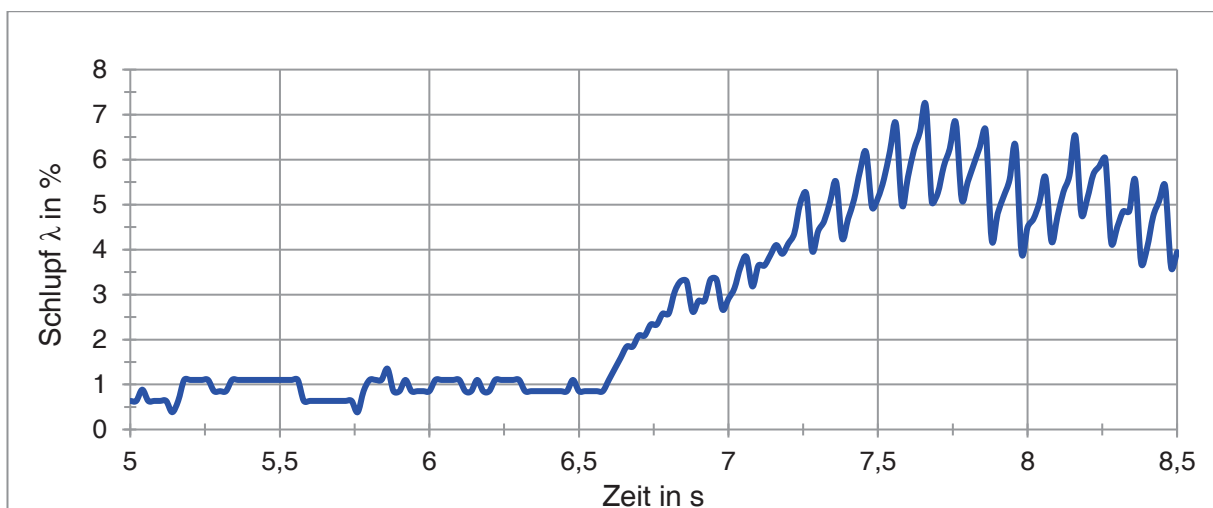


Abbildung 5.16: Darstellung des Reifenschlupf als Funktion der Zeit. (Versuch 74)

5.1.1.3 Versuchsreihe: Verzögerung

Der Fahrzustand „Verzögerung“ beschreibt das Bremsen eines Fahrzeugs. Als Bremsform wird die Vollbremsung mit ABS gewählt, um reproduzierbare Versuche durchführen zu können. Dabei wird, je nach Versuch, auf eine definierte Fahrgeschwindigkeit (40 und 80 km/h) beschleunigt. Die Vollbremsung wird bei einer Markierung 3 m vor der Lichtschranke (Versuchsaufbau ortsfestes Kamerasystem Abbildung 4.1) eingeleitet und bis zum Stillstand des Fahrzeugs beibehalten. Die Abbildung 5.17 zeigt, dass die Vollbremsung aus einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h wesentlich mehr Steine aufwirbelt als bei einer Vollbremsung aus 80 km/h. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Ausgangs-Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Darüber hinaus fliegen bei einer Vollbremsung ein großer Teil der aufgewirbelten Steine quer zur Fahrtrichtung, wie in der Abbildung 5.18 dargestellt.



Abbildung 5.17: Das Bild links zeigt eine Vollbremsung aus 80 km/h und das Bild rechts zeigt die Vollbremsung aus 40 km/h (rechts). Die Vollbremsung aus einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h wirft wesentlich mehr Steine auf, als bei 80 km/h.

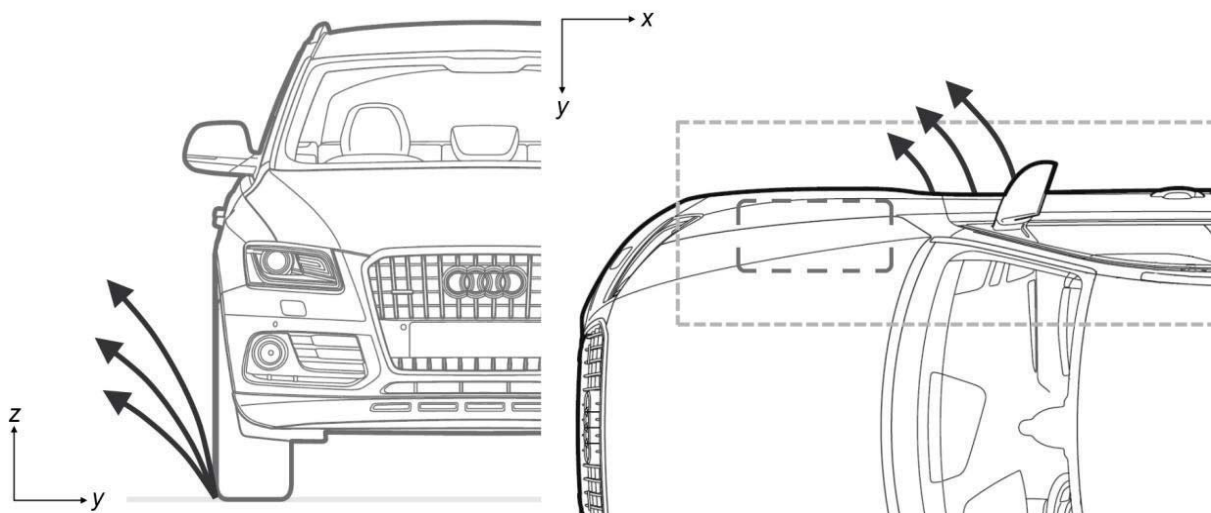


Abbildung 5.18: Schematische Darstellung des Steinabwurfs bei Verzögerung (Vollbremsung) in Vorderansicht (links) und Draufsicht (rechts). Die Flugbahnen der Steine sind quer zur Fahrtrichtung [8.3].

5.1.1.4 Versuchsreihe: Regenfahrt

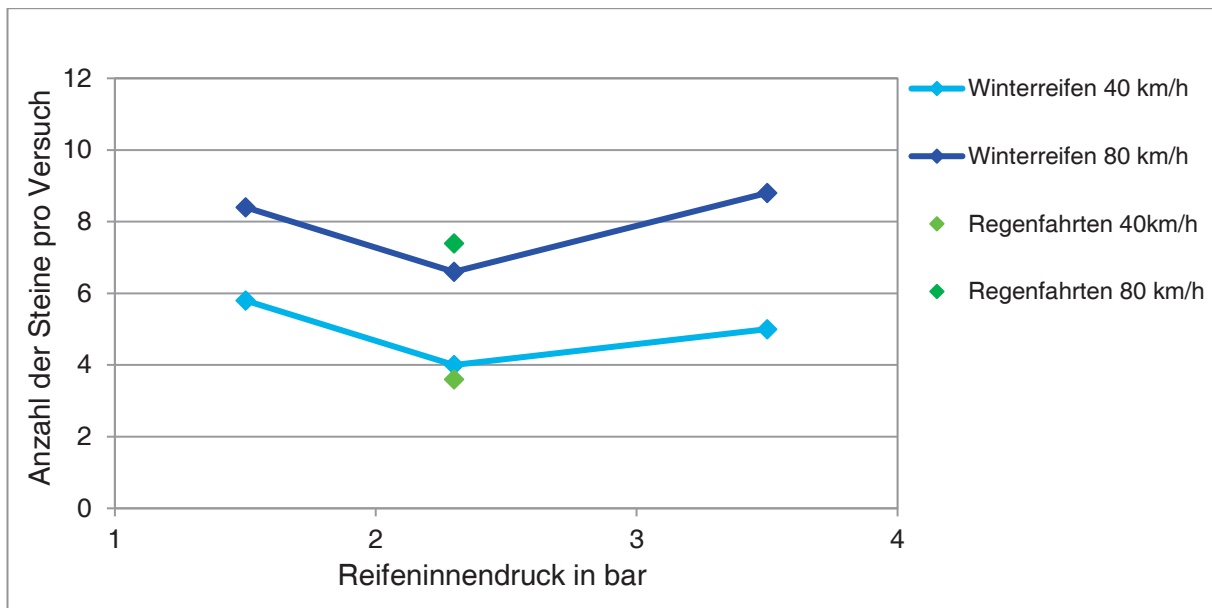


Abbildung 5.19: Anzahl abgeworfene Steine in Abhängigkeit vom Reifendruck, WR, Standardfahrten bei regennasser Fahrbahn und konstanter Fahrt

Die Versuchsreihe „Regenfahrt“ wurde nur mit dem vom Reifenhersteller empfohlenen Reifeninnendruck von 2,3 bar durchgeführt. Bei den konstanten Fahrten gab es nur geringe Unterschiede: Insbesondere bei Fahrten mit 40 km/h werden weniger Steine (-0,4 %) pro Versuch abgeworfen als bei den Standardfahrten (ohne nasser Fahrbahn). Bei den konstanten Fahrten mit 80 km/h hingegen werden sogar mehr Steine (+0,8 %) pro Versuch abgeworfen (Abbildung 5.19).

Beim beschleunigten Anfahren (Abbildung 5.20) ergibt sich mit -1 Stein je Versuch ebenfalls nur eine geringe Abweichung gegenüber der Standardbedingung bei trockener Fahrbahn. Bei Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h lässt sich feststellen, dass sich die Anzahl der abgeworfenen Steine um -2,25 % je Versuch verringert.

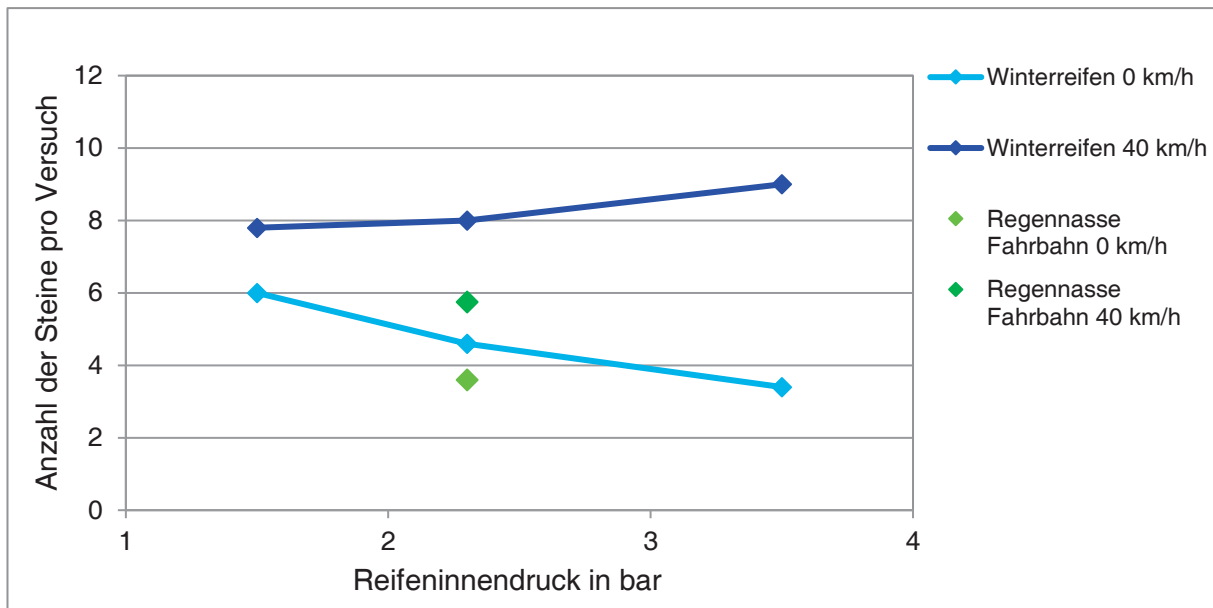


Abbildung 5.20: Anzahl abgeworfene Steine in Abhängigkeit vom Reifendruck, WR, Standardfahrten bei regennasser Fahrbahn unter Vollastbeschleunigung

Die Ergebnisse aus den Versuchsfahrten mit dem fahrzeugfesten Kamerasystem werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt, sondern dienen lediglich zur Validierung der Versuchsfahrten mit dem ortsfesten Kamerasystem.

5.2 Auswertung der Oberflächenschädigung

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Oberflächenschädigung aus den Fallturmversuchen dargestellt und analysiert. Die Ergebnisse werden nacheinander in den einzelnen Versuchsreihen beschrieben.

5.2.1 Versuchsreihe 1: Einfluss des Auftreffwinkels des Projektils Stein

Die Versuchsreihe beschreibt die realitätsnahe Nachstellung des Steinschlagmechanismus analog der Fahrversuche unter definierten Bedingungen im Fallturm-Prüfstand. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss der unterschiedlichen Auftreffwinkel von 6 bis 45°. Als Projektil diente hierbei ein Stein aus Kiesel-Splitt (Durchmesser 7 mm und Masse 0,4 g). Die bei Fallhöhen von 5 und 10 m erzeugten maximalen Eindringtiefen werden in der Abbildung 5.21 dargestellt. Hierbei lässt sich kein Zusammenhang zwischen der maximalen Eindringtiefe und dem Auftreffwinkel erkennen. Bei den Versuchen bei 5 m Fallhöhe schwankt die maximale Eindringtiefe zwischen 5 µm und 15 µm.

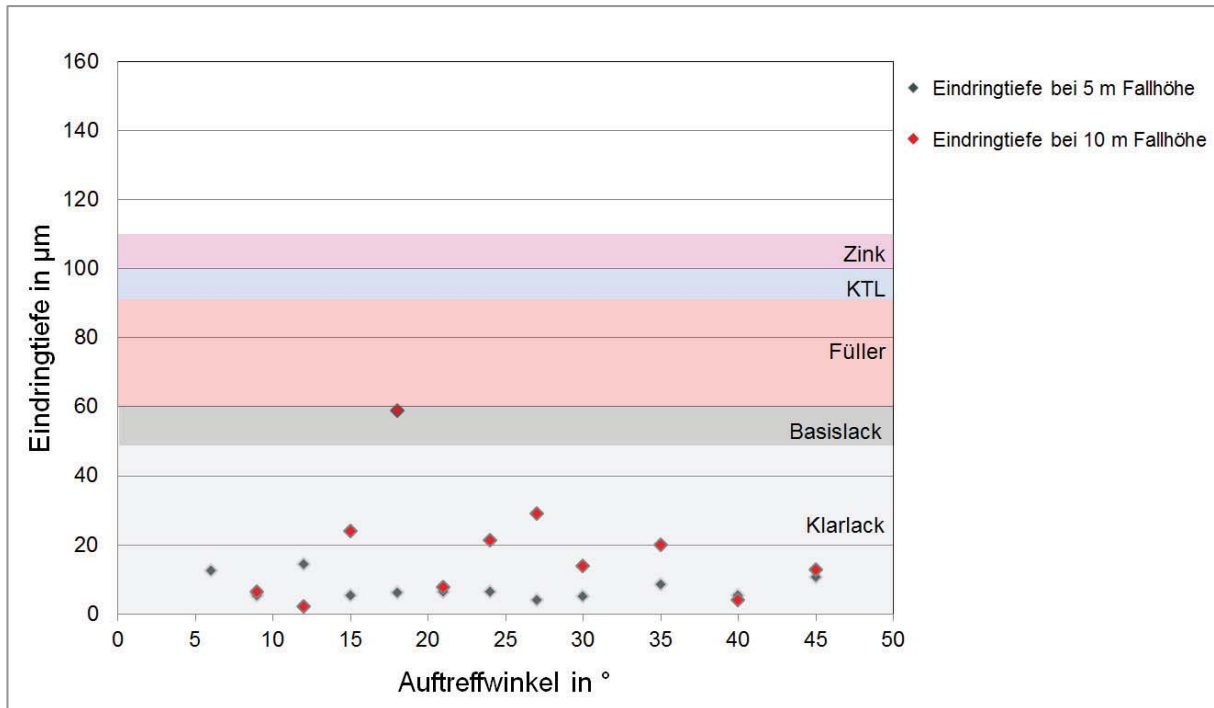


Abbildung 5.21: Einfluss der Auftreffwinkel auf die maximale Eindringtiefe bei 5 m und 10 m Fallhöhe mit dem Projektil Stein aus Kiesel-Splitt (0,4 g, \varnothing 7 mm)

In diesem Fall wird nur die Klarlackschicht beschädigt. Auch bei den Ergebnissen aus 10 m Fallhöhe ist kein Zusammenhang zwischen der maximalen Eindringtiefe und dem Auftreffwinkel zu erkennen, außer dass die Eindringtiefe bei 10 m Fallhöhe größer ist als bei 5 m. Hier dringt der Stein zwar tiefer in die Beschichtung ein, dennoch ist bei allen Versuchen, abgesehen von einer Ausnahme, immer nur die Klarlackschicht betroffen. Dieser Einzelfall bei 10 m stellt den Maximalwert bei einem Auftreffwinkel von 18° dar. Der Stein durchdringt in diesem Fall den Basislack bis zum Füller. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit dem Projektil Stein ließen sich nur mit Schwierigkeiten reproduzieren. Die Versuche mussten mehrmals wiederholt werden, bis mit dem Projektil ein Treffer auf der Probenplatte erzielt wurde. Der Hauptgrund der eingeschränkten Reproduzierbarkeit ist die Form der Projektile. Die Steine stellen immer eine unsymmetrische Form dar, bei dem die Steine unterschiedlich scharfe Kanten aufweisen. Aufgrund der ungleichmäßigen Form der Steine drehen sich die Steine in der Luft. Dies bedeutet, dass selbst bei Versuchen, die nur mit einem Stein durchgeführt werden, sich der Stein beim Auftreffen auf die Probenplatte nie in der gleichen Position befindet. Der Stein trifft entweder mit einer mehr oder weniger scharfen Kante oder mit einer runden Kante auf.

5.2.2 Versuchsreihe 2: Reduzierung der Parameter von Versuchsreihe 1

Die zweite Versuchsreihe zeigt den Einfluss unterschiedlicher Auftreffwinkel auf die maximalen Eindringtiefen bei einer Fallhöhe von 15 m. Hierbei diente ein Stein mit einem Durchmesser von 6,14 mm und einer Masse von 0,29 g als Projektil.

In Abbildung 5.22 werden die Ergebnisse dieser Versuchsreihe dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Bedingungen nicht gegeben war, da die maximalen Eindringtiefen der Einschläge Abweichungen bis zu ca. 35 μm aufwiesen. So war bei einem Auftreffwinkel von 40° der Minimalwert der Eindringtiefe nur ein Viertel so groß wie der Maximalwert. Die Ursache liegt in der unregelmäßigen Form des Projektils (Stein) in Verbindung mit dessen Rotation. Obwohl alle Versuche unter gleichen Bedingungen und mit demselben Projektil durchgeführt wurden, traf der Stein entweder mit einer mehr oder weniger scharfen Kante oder mit einer runden Kante auf die Probenplatte auf. Daraus folgend wurden für die nachfolgenden Versuchsreihen 3 bis 5 speziell angefertigte geometrische Projektile in der Form eines Dodekaeders verwendet, um möglichst reproduzierbare Schädigungen der Lackoberfläche erzielen zu können.

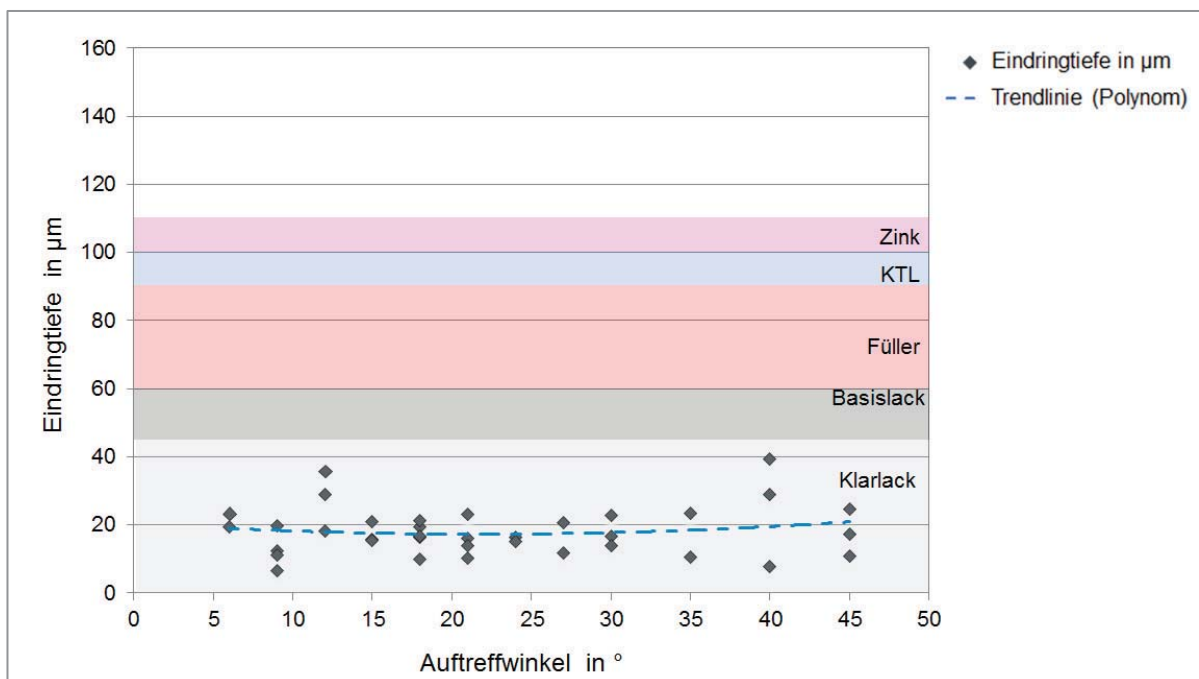


Abbildung 5.22: Einfluss der Auftreffwinkel auf die maximale Eindringtiefe bei einer Fallhöhe von 15 m und einer berechneten Energie von 27 mJ mit dem Projektil Stein (\varnothing 6,14 mm und 0,29 g)

5.2.3 Versuchsreihe 3: Einfluss des Auftreffwinkels mit Dodekaeder-förmigen Projektilen unter definierten Bedingungen

In der dritten Versuchsreihe wurden die durch die verschiedenen Projektilen verursachten Schädigungen unter gleichbleibenden Randbedingungen (Energie, Temperatur und Auftreffwinkel) miteinander verglichen. Die Versuche erfolgten bei einem Auftreffwinkel von 21° (Durchschnittswert) mit einer kinetischen Energie von 30 mJ. Die Abbildung 5.23 zeigt die Ergebnisse der maximalen Eindringtiefen unterschiedlicher Projektilmassen (Kapitel 4.2.1.2). Auf der x-Achse sind die Nummern der Projektilen (Steine) aufgetragen. Es wird deutlich, dass alle Projektilen Schädigungen bis zur Füllerschicht verursachen. Die maximale Eindringtiefe ist bei über 80 μm . Die meisten Einschläge (70%) hatten Tiefen im Bereich von 60 bis 70 μm . Somit hängt die maximale Eindringtiefe bei Steinschlag grundsätzlich von der Aufprallenergie ab. Die Analyse der einzelnen Einschläge durch die fünf Projektilen (Steine 1-5) beweist die Vergleichbarkeit der Schäden unabhängig von den Projektilen mithilfe der 3D-Aufnahme im Konfokalmikroskop.

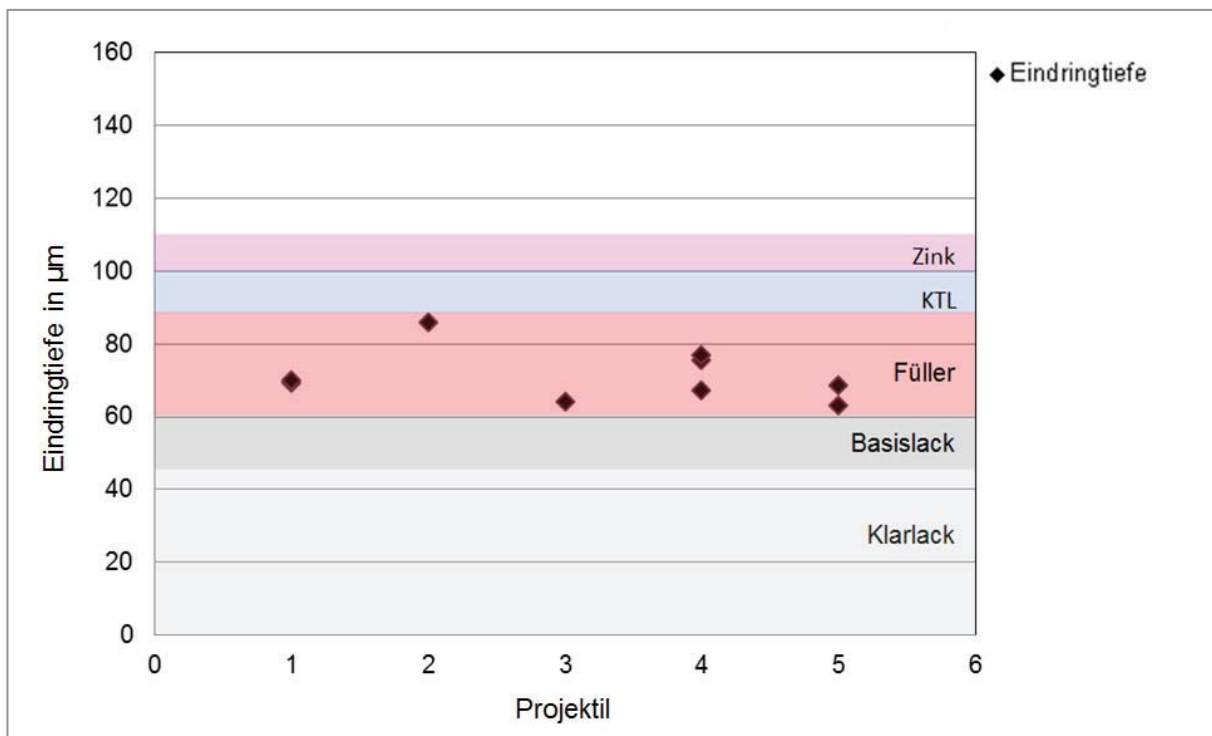


Abbildung 5.23: Einfluss der Dodekaeder-förmigen Projektilen 1 bis 5 bei einem Auftreffwinkel von 21° und einer kinetischen Energie von 30 mJ

Die experimentellen Ergebnisse bestätigen die Bedeutung der Parameter Auftreffenergie und Auftreffwinkel. Für die weiteren Versuchsreihen wurde das Projektil 5 mit der Masse 1 g verwendet.

5.2.4 Versuchsreihe 4: Reduzierung der Parameter von Versuchsreihe 3

In der vierten Versuchsreihe wurde der Einfluss des Auftreffwinkels auf die maximale Eindringtiefe mit einem Dodekaeder als Projektil untersucht. In der Abbildung 5.24 werden die Ergebnisse der maximalen Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Aufprallenergie dargestellt. Die polynomische Trendlinie soll die Bewertung der Ergebnisse erleichtern. Dabei wird deutlich: je größer der Auftreffwinkel, desto tiefer ist das Eindringen der Projektile in den Lackaufbau. Die maximale Eindringtiefe des Dodekaeders verdreifacht sich von ca. 30 μm bei 6° bis ca. 110 μm bei 45°. Des Weiteren zeigt die Trendlinie sehr klar, dass sich die Steigung bei zunehmendem Auftreffwinkel ständig abschwächt.

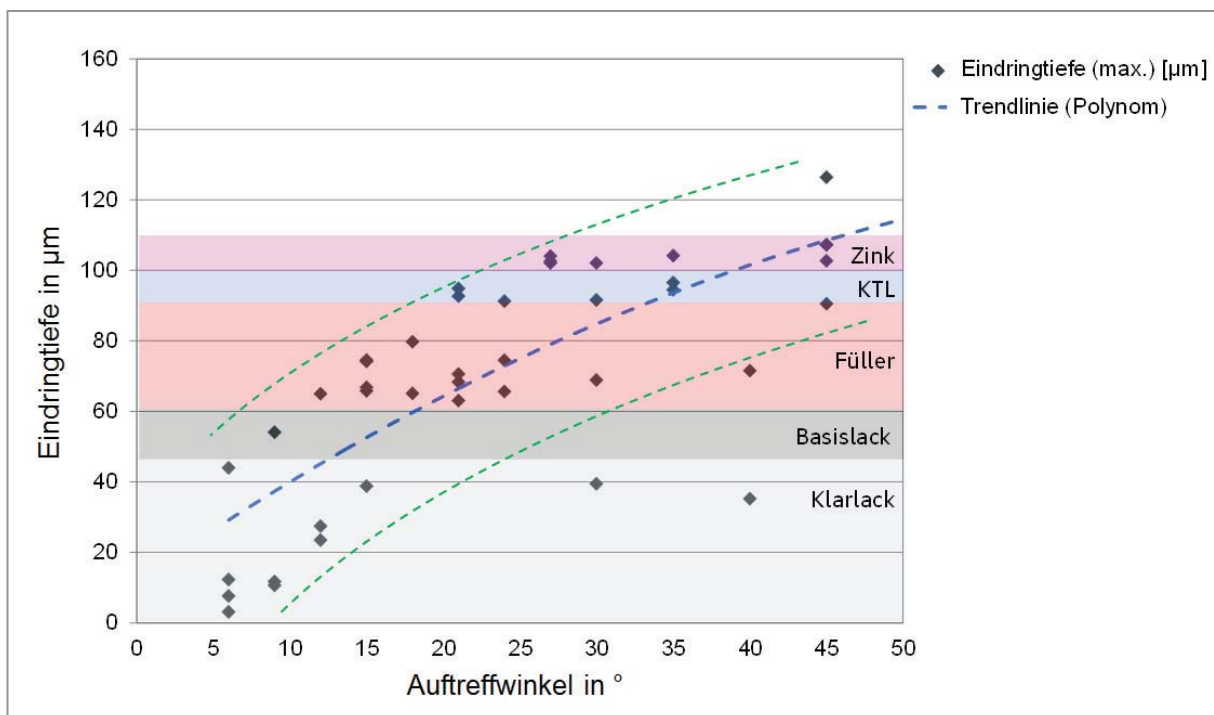


Abbildung 5.24: Einfluss der Auftreffwinkel auf die maximale Eindringtiefe mit Dodekaeder-förmigen Projektil (Nummer 5) bei 30 mJ (1 g und 3,25 m Fallhöhe)

Ab Auftreffwinkeln von mehr als 21° können die Schädigungen die KTL-Schicht durchdringen. In einigen Fällen gibt es Durchdringungen bis auf das Substrat. Jedoch können große Abweichungen beim gleichen Auftreffwinkel nicht vernachlässigt werden. Beim Auftreffwinkel von 30° ist zwischen dem minimalen und maximalen Wert

der Eindringtiefe eine Differenz von 60 μm und bei den Auftreffwinkeln 6°, 9°, 12° und 15° von ca. 40 μm . Unterteilt man die minimalen und maximalen Werte der Eindringtiefe in zwei Gruppen und legt zwei Trendlinien (grün) in einem Abstand von 20 μm von der mittleren Trendlinie (schwarz) in die Grafik hinein, dann ist, wenn die Extremwerte bei 30° und 40° ausgeschlossen werden, eine gleichmäßige Steigung beider Gruppen zu erkennen. Die Schädigungen befinden sich zwischen diesen zwei grünen Trendlinien, welche die Streuung von $\pm 20 \mu\text{m}$ der maximalen Eindringtiefen abbilden (Abbildung 5.24). Ein Grund hierfür könnte die Abweichung zwischen dem berechneten Wert der angestrebten Energie beim Aufprall und der tatsächlichen Aufprallenergie sein. Aus diesem Grund wurden die entstandenen Schädigungen in Kapitel 6.2 in verschiedene Einschlagsformen unterteilt.

5.2.5 Versuchsreihe 5: Einfluss des Auftreffwinkels von 90° mit Dodekaederförmigen Projektilen zur Bestimmung des empirischen Faktors k

Die fünfte Versuchsreihe diente zur Bestimmung des empirischen Faktors k aus der Panzerformel, welcher die funktionalen Zusammenhänge zwischen Aufprallenergie und maximaler Eindringtiefe beschreibt (siehe Kapitel 6.2.2). Dazu wurden mit dem Dodekaederförmigen Projektil bei einem Auftreffwinkel von 90° Versuche mit Aufprallenergien von 20, 30 und 40 mJ durchgeführt. In der Abbildung 5.25 ist die maximale Eindringtiefe in Abhängigkeit von der kinetischen Energie der Projektile vor dem Aufprall aufgetragen. Die Darstellung beweist die Abhängigkeit zwischen maximaler Eindringtiefe und Aufprallenergie. Die Schädigungen dringen in diesem Fall zum Substrat der Probenplatte vor. Jedoch sind die Einschläge bei gleicher Energie in einem Bereich von 5 μm konzentriert, was eine hohe Aussagekraft sichert. Bei einer Erhöhung der Aufprallenergie lässt sich eine deutliche Steigerung der maximalen Eindringtiefe erkennen. Das bedeutet, dass die Schädigungstiefe hauptsächlich von der Aufprallenergie abhängig ist. Je größer die Energie ist, desto tiefer die Schädigung. Somit kann die Hypothese bestätigt werden, dass bei Steinschlag die Eindringtiefe grundsätzlich von der Aufprallenergie abhängt. Bei gleicher Aufprallenergie stimmen die Schädigungen trotz unterschiedlicher Projektillmasse und Geschwindigkeit überein. Die Einschlagsformen sind bei einem Auftreffwinkel von 90° auch bei unterschiedlichen Energien identisch. Die Schädigung hat die Form eines Tetraeders. Solche regelmäßigen Schädigungsformen ermöglichen die mathematische Beschreibung der Beziehung zwischen Schädigungsoberfläche und Schädigungstiefe.

Die Analyse der Schädigungsbilder und die Klassifizierung der verschiedenen Einschlagsformen folgen in Kapitel 6.2.1

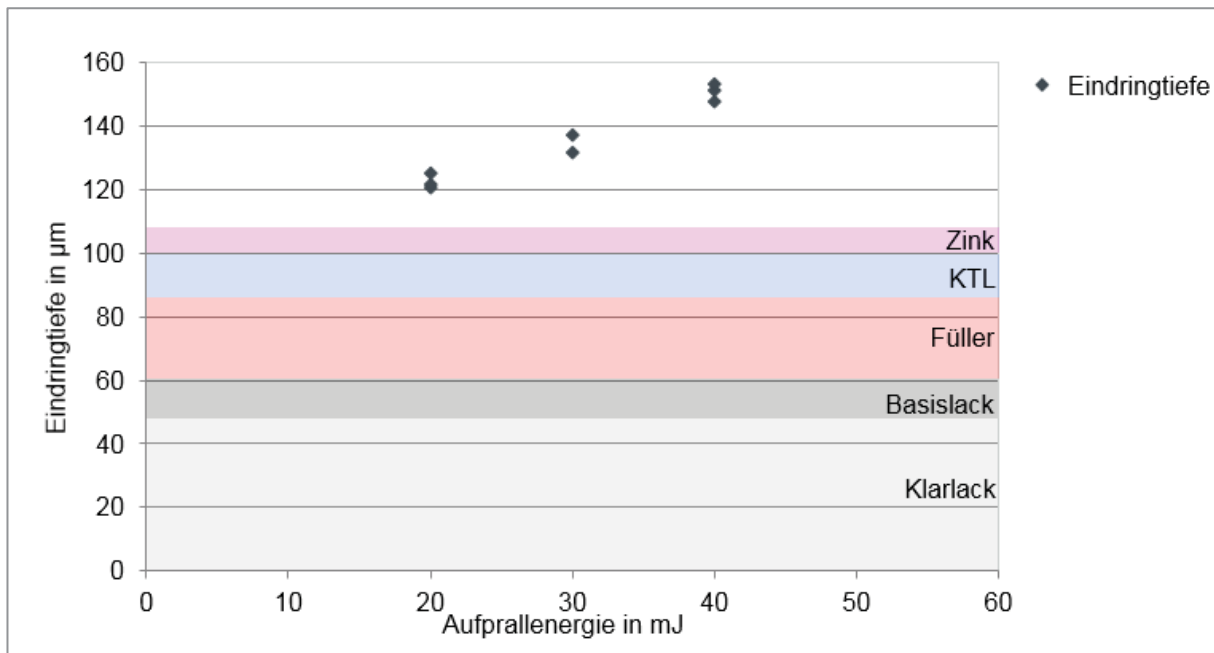


Abbildung 5.25: Einfluss der verschiedenen Aufprallenergien auf die maximale Eindringtiefe bei einem Auftreffwinkel von 90° mit einem Dodekaeder-förmigen Projektil (Nummer 5)

5.3 Schädigungsanalyse für die Steinschlagsimulation

5.3.1 Vergleichsanalyse der Oberflächen nach Splitterprobung

In dieser Versuchsreihe wurden reale Steinschläge am Kotflügel und Schweller nach einer Splitterprobung von 200 km mit den Einschlägen aus den Fallturmversuchen verglichen. Die realen Steinschlagschäden wurden (basierend auf der für das Fahrzeug durchgeführten Steinschlagsimulation) nach ihren Auftreffwinkeln in fünf Bereiche unterteilt. Anschließend wurden jeweils drei Einschläge aus jedem Bereich ausgewählt und ausgewertet. In Abbildung 5.26 ist die Übersicht der Einschläge nach der Splitterprobung dargestellt. Die Einschlagsform der Schädigung ändert sich mit steigendem Auftreffwinkel von schmalen kratzer-förmigen Einschlägen bis hin zu runden flächigen Steinschlägen bei großen Auftreffwinkeln. Die Einschlagsformen aus der Splitterprobung zeigten ein Schädigungsbild, welches grundsätzlich mit den Schädigungen aus den Fallturmversuchen korreliert.

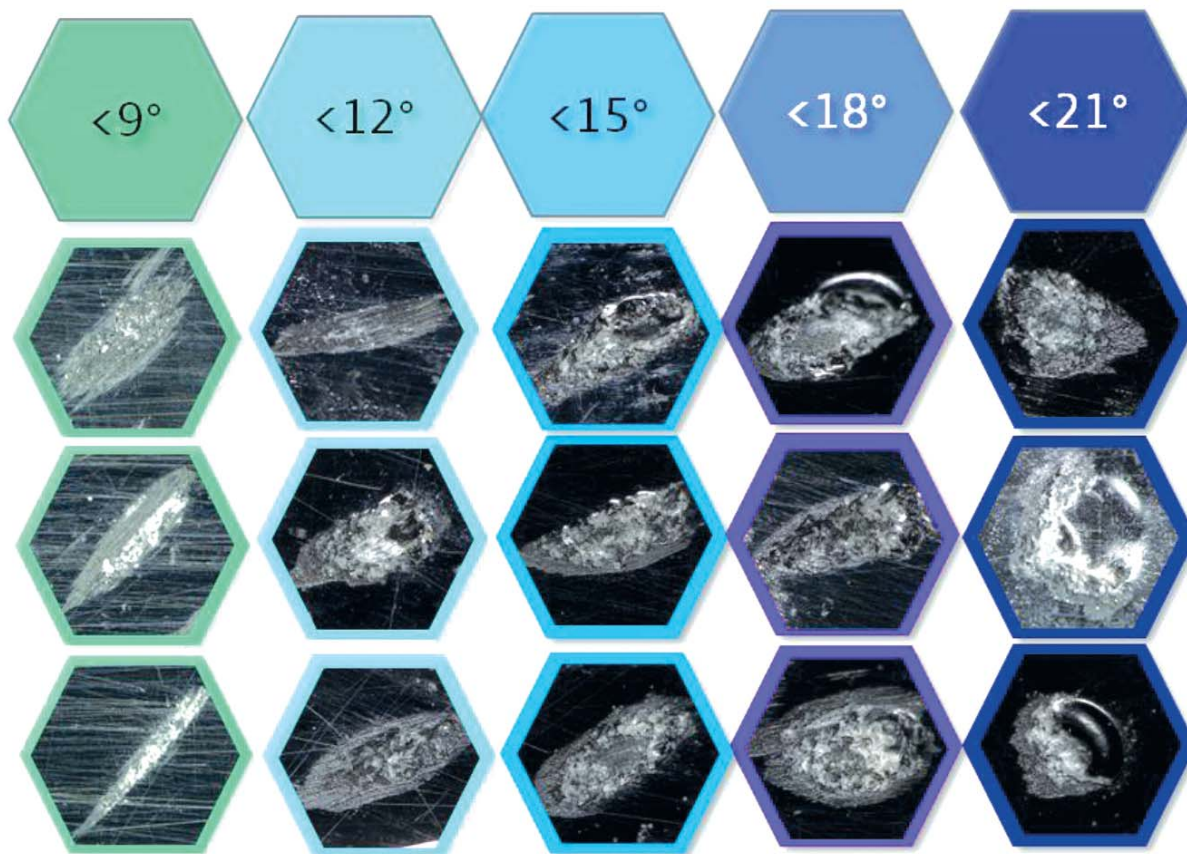


Abbildung 5.26: Darstellung der realen Steinschläge am Kotflügel und Schweller nach der 200 km Splitterprobung

In Abbildung 5.27 werden die Schädigungsparameter wie maximale Eindringtiefe aus der Splitterprobung mit den Auftreffwinkeln aus der Steinschlagsimulation gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass bei kleinen Auftreffwinkeln von 9° nur oberflächliche Schädigungen in der Klarlackschicht entstehen. Jedoch können die Schädigungen bei großen Auftreffwinkeln bis zum Grundmaterial gehen. Obwohl die Ergebnisse bei steigendem Auftreffwinkel eine klare Tendenz aufzeigen, können die Einschläge wegen der unbekanntnen Einflussparameter, wie z.B. Steingewicht und Aufprallenergie, nicht miteinander verglichen werden. Zu beachten ist, dass die Auftreffwinkel der realen Einschläge nicht experimentell, sondern mit Hilfe der Steinschlagsimulation ermittelt wurden. Mithilfe dieser Auswertung ist die Vergleichbarkeit der Steinschläge aus der Splitterprobung mit den Schädigungen aus den Fallturmversuchen bewiesen, da Einschlagsformen und auch die Eindringtiefen des Feldversuches (reale Einschläge) mit den Ergebnissen aus dem Fallturm korrelieren.

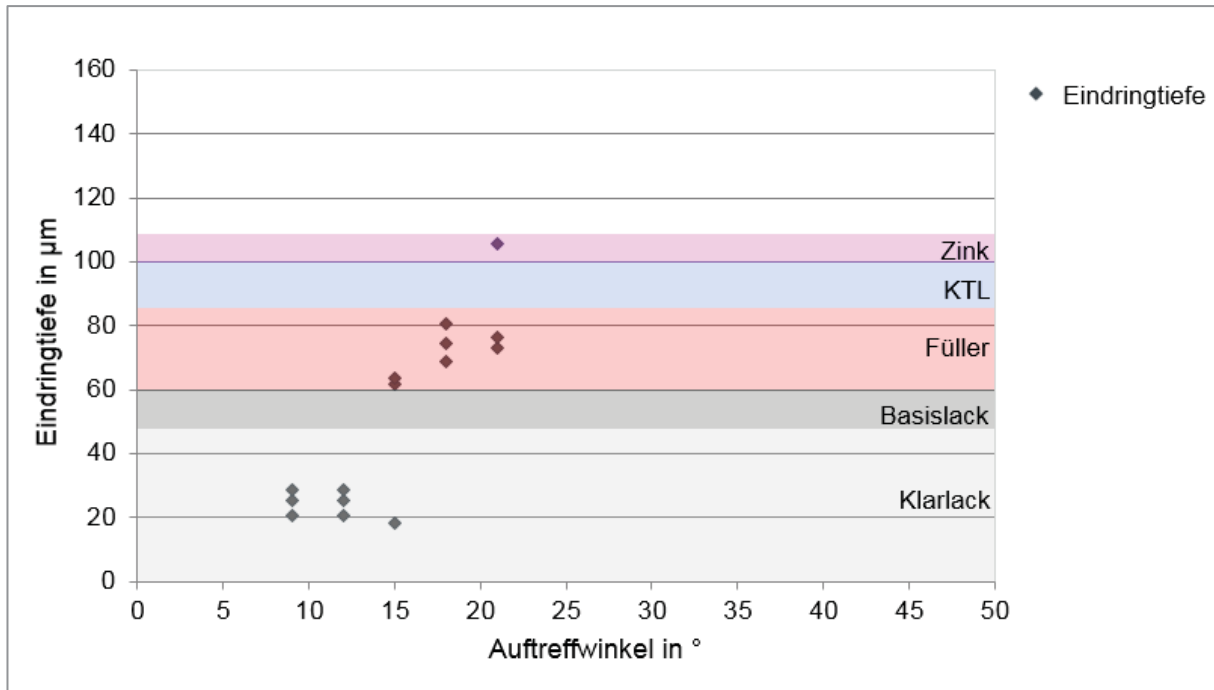


Abbildung 5.27: Gegenüberstellung Schädigungsparameter, wie maximale Eindringtiefe aus der Splitterprobung mit den Auftreffwinkeln aus der Steinschlagsimulation

5.3.2 Methodik zur Schadensauswertung

Die Ergebnisse der jeweiligen Verfahren werden zur Beurteilung der visuellen und digitalen Schadensauswertung (siehe Methodik Kapitel 4.3.2.1 und Kapitel 4.3.2.2) im nachstehenden Diagramm (Abbildung 5.28) gegenübergestellt. Hierbei ist generell festzustellen, dass die Analysenergebnisse der visuellen Auswertung (gepunktete Linien) um durchschnittlich 1,1 Kennwertklassen über den Ergebnissen der digitalen Auswertung (durchgehende Linien) liegen.

Bei der Auswertung des Schwellers (Unterteilung in Sektoren der Hauptebene und Unterkante analog Abbildung 4.16) liegt die mittlere Abweichung bei der Unterkante des Schwellers bei 0,65 Kennwertklassen. Die mittlere Abweichung der Auswertung der Hauptebene liegt bei 0,45 Kennwertklassen.

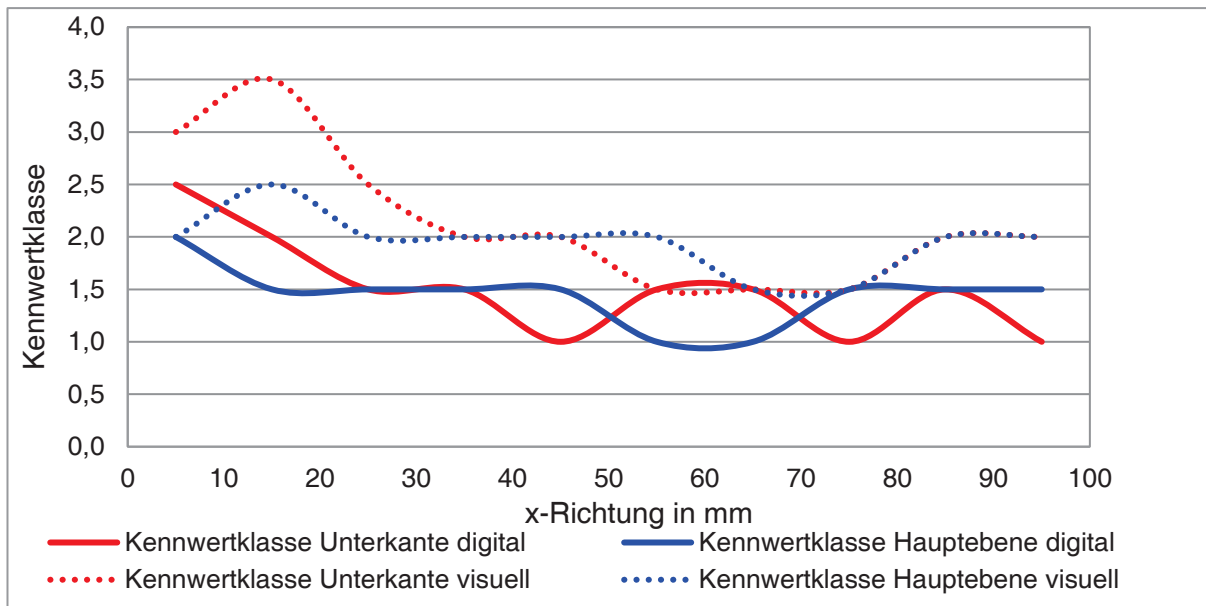


Abbildung 5.28: Kennwertverteilung: Gegenüberstellung der visuellen zur digitalen Methodik der Schadensauswertung am Beispiel eines Audi Q3 S-Line Schwellers

Die Ergebnisse der visuellen und digitalen Schadensbewertung werden in Abbildung 5.29 mit dem Ergebnis der Simulation verglichen. Zur Vereinfachung sind hierbei stellvertretend die Ergebnisse der visuellen und digitalen Auswertung der Unterkante des Schwellers gegenübergestellt. Die Kennwertklassen aus der visuellen und digitalen Auswertung können derzeit nur mit den in der Simulation ausgegebenen Auftreffwinkeln verglichen werden. Das Schädigungspotential durch den abgeworfenen Stein ist umso größer, je größer der Auftreffwinkel ist. Bei der Gegenüberstellung der Kurvenverläufe aus dem Simulationsergebnis und dem Ergebnis aus dem Fahrversuch (Kennwertklasse visuell / digital) zeigt sich im Kurvenverlauf eine vergleichbare Tendenz. Das Schädigungspotential (vertikale Sekundärachse) weist zu Beginn des Schwellers Maximalwerte und am Ende des Schwellers Minimalwerte auf. Hierbei ist auffällig, dass das Schädigungspotential über die Schwellerlänge stark abnimmt, welches in diesem Ausmaß nicht mit dem Ergebnis aus dem Fahrversuch bestätigt werden kann. Die Ursache für die Abweichung liegt darin, dass in der Steinschlagsimulation derzeit keine Auftreffhäufigkeiten berücksichtigt werden. Bei den Versuchsfahrten führt die hohe Steinschlagbelastung zu einer stärkeren Schädigung an der Lackschicht und somit zu höheren Kennwerten. Bei der Gegenüberstellung der Simulations- und Analyseergebnisse ergibt sich somit nur eine Tendenz bezüglich des ähnlichen Kurvenverlaufs.

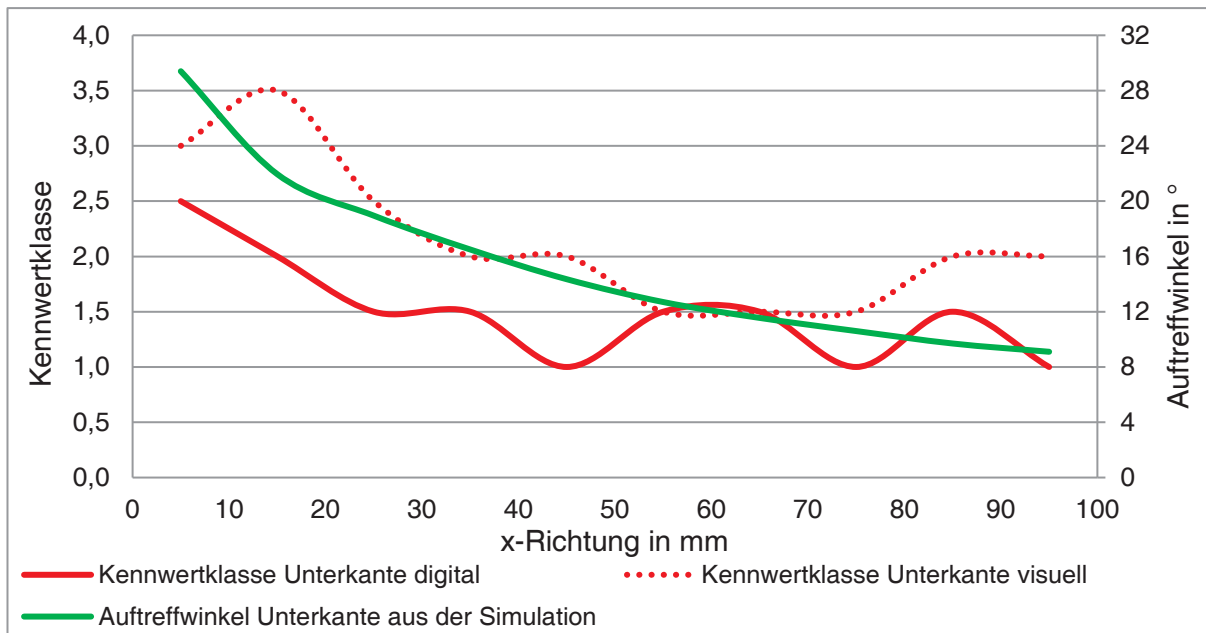


Abbildung 5.29: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit der Auswertung aus der Kennwertverteilung (digital und visuell) am Beispiel eines Audi Q3 S-Line Schwellers

Das Ziel der Oberflächenanalyse war die Quantifizierung der Anzahl der Einschläge, um zukünftig eine bessere Vergleichbarkeit der Simulations- und Analyseergebnisse zu ermöglichen. Die visuelle Auswertung ist im Vergleich zur digitalen Auswertung subjektiv. Dadurch ist eine reproduzierbare Ergebnisbeurteilung nicht zu erwarten. Andererseits hat diese Herangehensweise die Vorteile einer höheren Flexibilität und einer schnelleren Durchführbarkeit der Analyse. Die digitale Auswertung führt durch den Softwareeinsatz und die Vorgaben zur Verfahrensdurchführung zu objektiven und verwertbaren Ergebnissen. Hingegen gestaltet sich die Erstellung der Fotoaufnahmen der Versuchskörper bei der digitalen Auswertung als schwierig, da durch minimal ausgeleuchtete Bauteilbereiche Flächen entstehen, die anschließend nicht auswertbar sind. Erschwerend kommt hinzu, dass bei den Bauteilen nur Teilbereiche aufgenommen werden können, da ansonsten bei Totalen (Fotoaufnahmen) die nötige Tiefenschärfe verloren geht. Des Weiteren wird nicht berücksichtigt, dass durch die gewölbten Oberflächen Fehler verursacht werden, da Teilbereiche der Versuchskörper nicht erfasst werden können. Das Ergebnis der digitalen Auswertung kann zudem durch eine Veränderung des Filters verfälscht werden, da die Definition des Schwellwertfilters zur Generierung eines Grauwertbildes im vorliegenden Fall exakt auf die Helligkeit des Bildes abgestimmt ist.

6 Diskussion der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse mit den einleitend aufgestellten Hypothesen diskutiert. Das Thema Steinabwurf, die Thematik der Oberflächenschädigung und die Steinschlagsimulation werden hierbei in separaten Unterkapiteln behandelt. Die Zusammenführung der Ergebnisse aus den Versuchsfahrten und der Fallturmversuche wird im letzten Abschnitt zur Weiterentwicklung der Steinschlagsimulation beschrieben.

6.1 Analyse des Mechanismus beim Steinabwurf

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse mit den Theorien zu den Einflussparametern des Steinabwurfs und mithilfe von aufgestellten Hypothesen diskutiert.

Bei konstanter Fahrt nimmt die durchschnittlich abgeworfene Steinzahl mit der Fahrgeschwindigkeit zu. Das gilt sowohl für Sommerreifen als auch für Winterreifen und profillose Reifen (Slicks). Allerdings haben das Reifenprofil und der Reifeninnendruck Einfluss auf die Menge abgeworfener Steine. Dabei zeigt sich ein Zusammenhang mit der jeweils unterschiedlichen Reifenaufstandsfläche, da der Reifeninnendruck die Verformung des Reifens und die Reifenaufstandsfläche bestimmt. Im Anhang 9.13 sind die unterschiedlichen Reifenaufstandsflächen von Sommer-, Winter- und profillose Reifen bei unterschiedlichem Reifeninnendruck dargestellt.

In der Abbildung 6.1 ist der Einfluss des Reifenprofils bei Sommerreifen im Vergleich zu den Slicks und der Einfluss des Reifeninnendrucks auf die Anzahl abgeworfener Steine bei konstanter Fahrt mit 80 km/h dargestellt. Dabei wird die maximale Reifenaufstandsfläche mit der dazugehörigen Anzahl der Steine als 100 % angenommen und bei Änderung des Reifeninnendrucks ist eine Verbindung zwischen Reifenaufstandsfläche und Anzahl der Steine zu erkennen. Diese Aussage betrifft nur die konstante Fahrt. Bei den weiteren Fahrsituationen ergeben sich andere Erscheinungsbilder. Der Einfluss des Reifenprofils lässt sich bei der Fahrsituation „konstante Fahrt“ besonders gut anhand des Vergleichs der Sommerreifen und Slicks darstellen: Je größer die reale Reifenaufstandsfläche ist, desto stärker ist der Steinabwurf. Der Steinabwurf von Slicks ist bei gleichem Reifeninnendruck größer als

der von Sommerreifen. Bei Winterreifen nimmt jedoch der Steinabwurf unabhängig der realen Reifenaufstandsfläche zu (Abbildung 5.3, Seite 64).

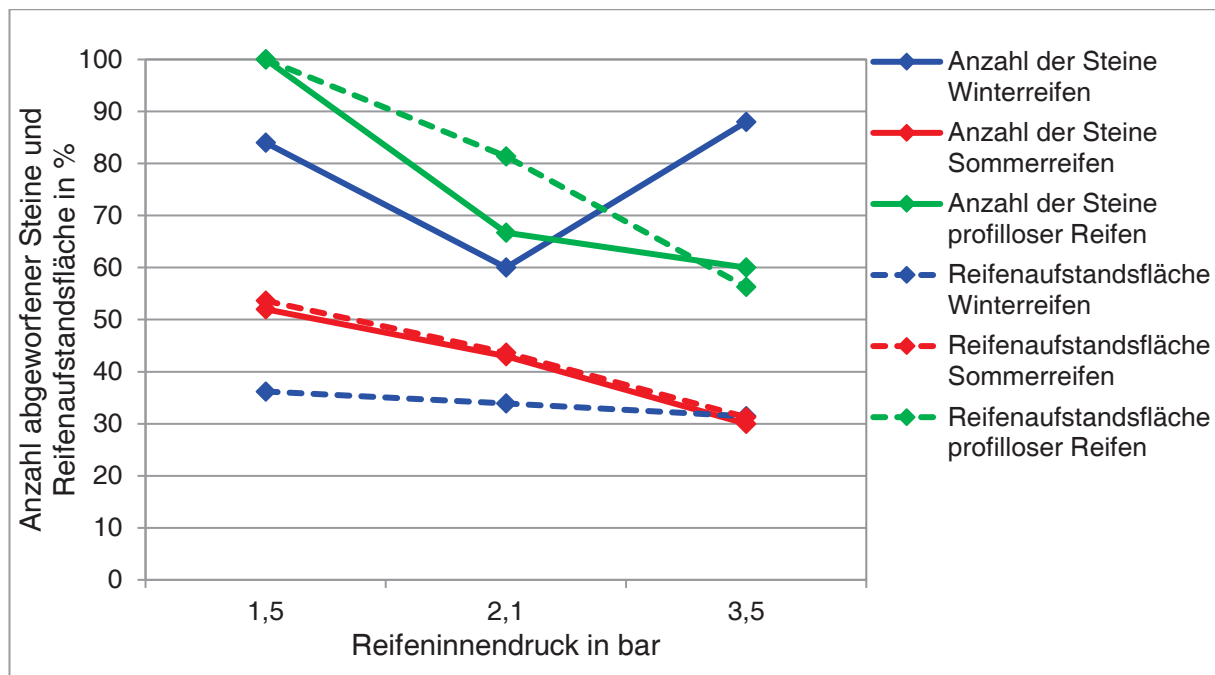


Abbildung 6.1: Einfluss des Reifeninnendrucks auf die Reifenaufstandsfläche und die Anzahl abgeworfener Steine bei konstanter Fahrt mit 80 km/h

Bei der Auswertung der Steingeschwindigkeiten in x-Richtung (Abbildung 6.2) wurde neben den Steingeschwindigkeiten im raumfesten Bezugssystem und fahrzeugfesten Bezugssystem eine Bewegung der senkrecht aufsteigenden Steine in Fahrtrichtung festgestellt. Insgesamt fliegen etwa ein Drittel der Steine gegen die Fahrtrichtung und zwei Drittel in Fahrtrichtung. Die Simulation der Aerodynamik, wie in Kapitel 4.1.1.1 beschrieben und im Anhang 9.7 dargestellt, zeigt jedoch keinen Einfluss von Verwirbelungen im Strömungsverlauf. Dennoch lässt sich ein gewisser Einfluss durch die in Fahrtrichtung mitgenommen Steine anhand der Videoanalyse aus den High-Speed-Aufnahmen durch die Auswertung der Steinflugbahnen (Abbildung 5.6, Seite 66) nachweisen.

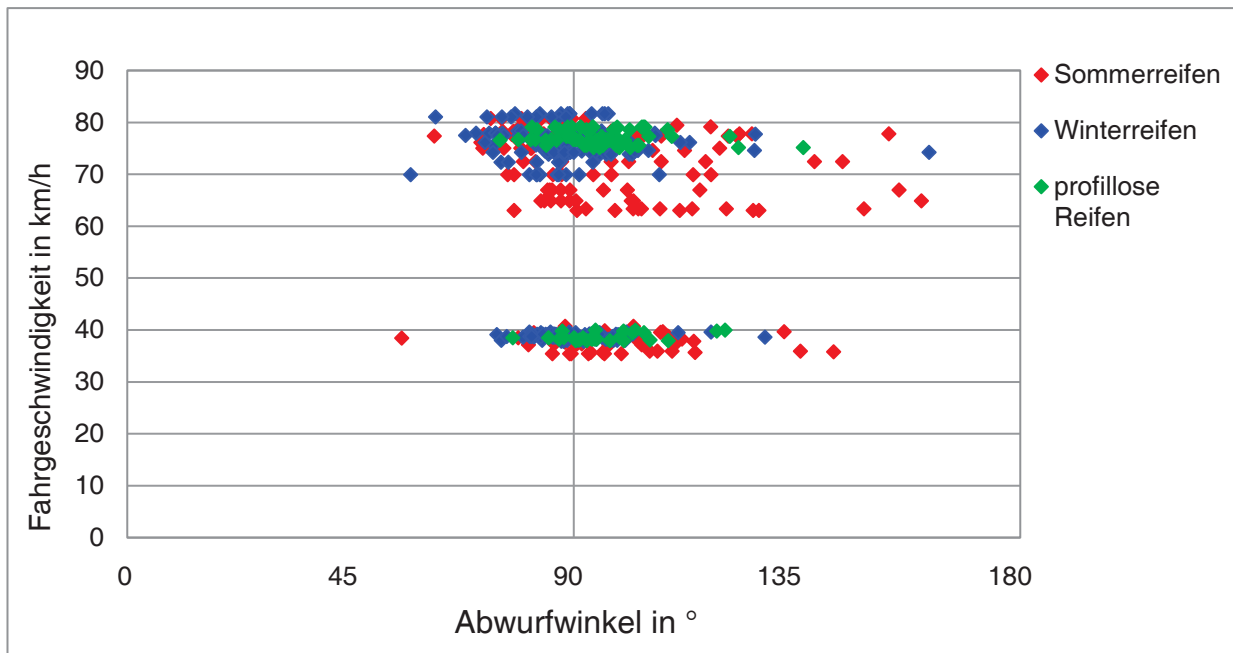


Abbildung 6.2: Inertiale Abwurfwinkel bei $x = 500$ mm bei konstanter Fahrgeschwindigkeit von 40 und 80 km/h. Hierbei sind die Flugbahnen in Abhängigkeit der Bereifung, Sommerreifen (rot), Winterreifen (blau) und profillosen Reifen (grün) unterteilt.

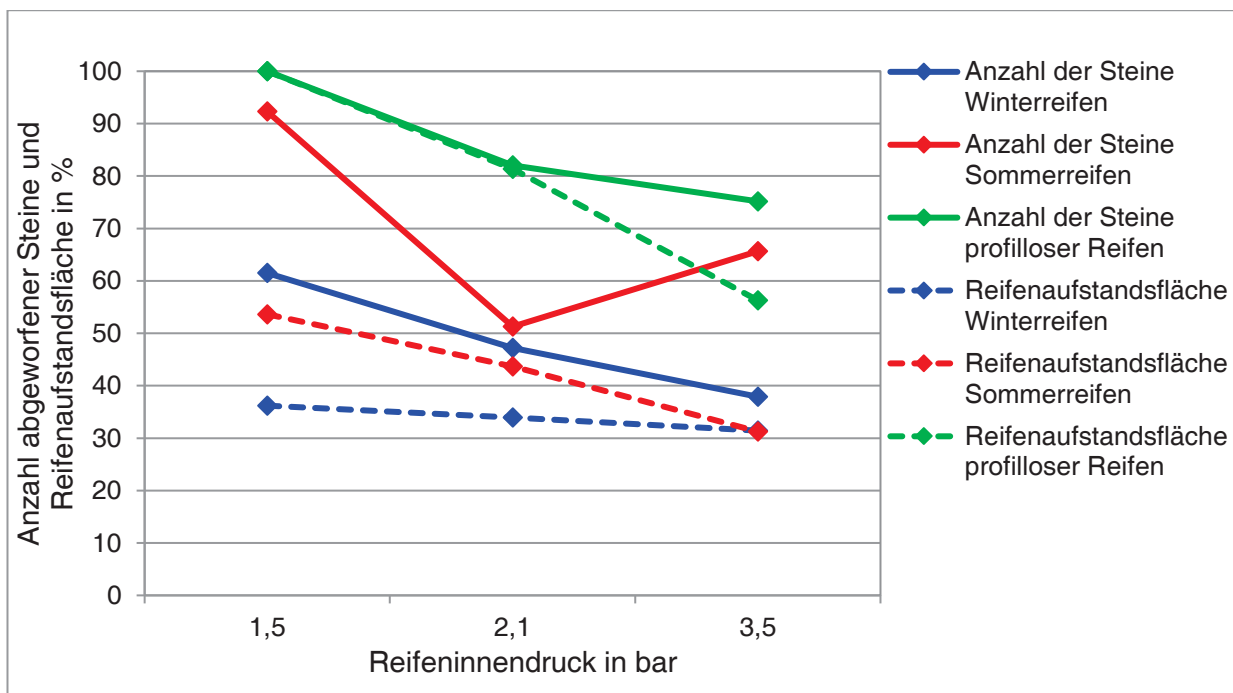


Abbildung 6.3: Einfluss des Reifeninnendrucks auf die Reifenaufstandsfläche und die Anzahl abgeworfener Steine beim beschleunigten Anfahren ab 0 km/h

Bei der Abbildung 6.3 ist der Einfluss der Reifenprofile und der Einfluss des Reifeninnendrucks auf die Anzahl abgeworfener Steine beim beschleunigten Anfahren dargestellt. Die Ergebnisse von dem beschleunigten Anfahren sind bei profillosen

Reifen vergleichbar mit den Ergebnissen aus der konstanten Fahrt, da bei größerer Aufstandsfläche der Steinabwurf zunimmt. Sommerreifen hingegen, haben beim beschleunigten Anfahren, bei kleiner Aufstandsfläche einen starken Steinabwurf. Dieser vermehrte Steinabwurf lässt annehmen, dass beim beschleunigten Anfahren das Profil der Sommerreifen durch Aufnahme und Abwurf von Steinen wie eine Schaufel wirkt.

Die in der folgenden Abbildung 6.4 dargestellte Fahrsituation „Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h“ ist in Abhängigkeit der Reifenaufstandsfläche mit der dazugehörigen Anzahl der Steine dargestellt. Die profillosen Reifen korrelieren in Abhängigkeit des Reifeninnendrucks zur Reifenaufstandsfläche analog des Verhaltens bei konstanter Fahrt und beim beschleunigten Anfahren ab 0 km/h. Die Sommerreifen zeigen ein komplett gegensätzliches Bild bei einer Beschleunigung des Fahrzeuges ab einer Geschwindigkeit von 40 km/h. Je größer der Reifeninnendruck bzw. kleiner die Reifenaufstandsfläche der Sommerreifen ist, desto stärker der Steinabwurf. Der vermehrte Steinabwurf ist ein Indiz dafür, dass das Profil der Sommerreifen bei erhöhtem Reifenschlupf durch Aufnahme und Abwurf von Steinen wie eine Schaufel wirkt. Dies ist auf den „Schaufel-Effekt“ bei Reifenschlupf zurückzuführen.

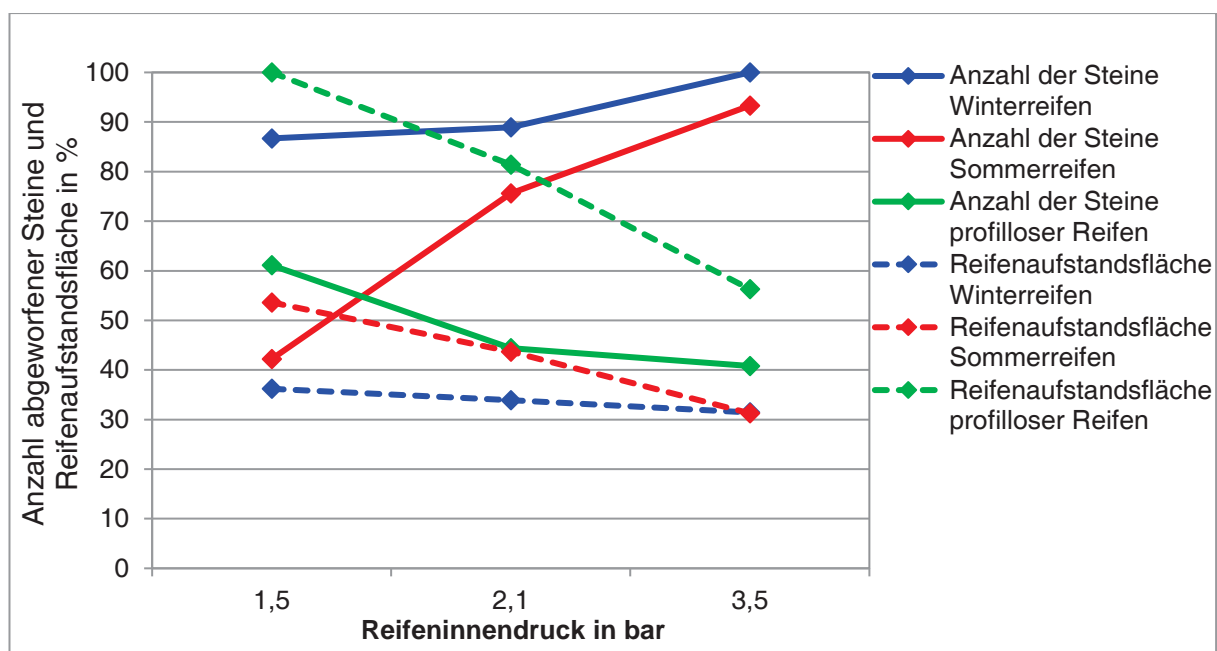


Abbildung 6.4: Einfluss des Reifeninnendrucks auf die Reifenaufstandsfläche und die Anzahl abgeworfener Steine bei einer Beschleunigung ab 40 km/h

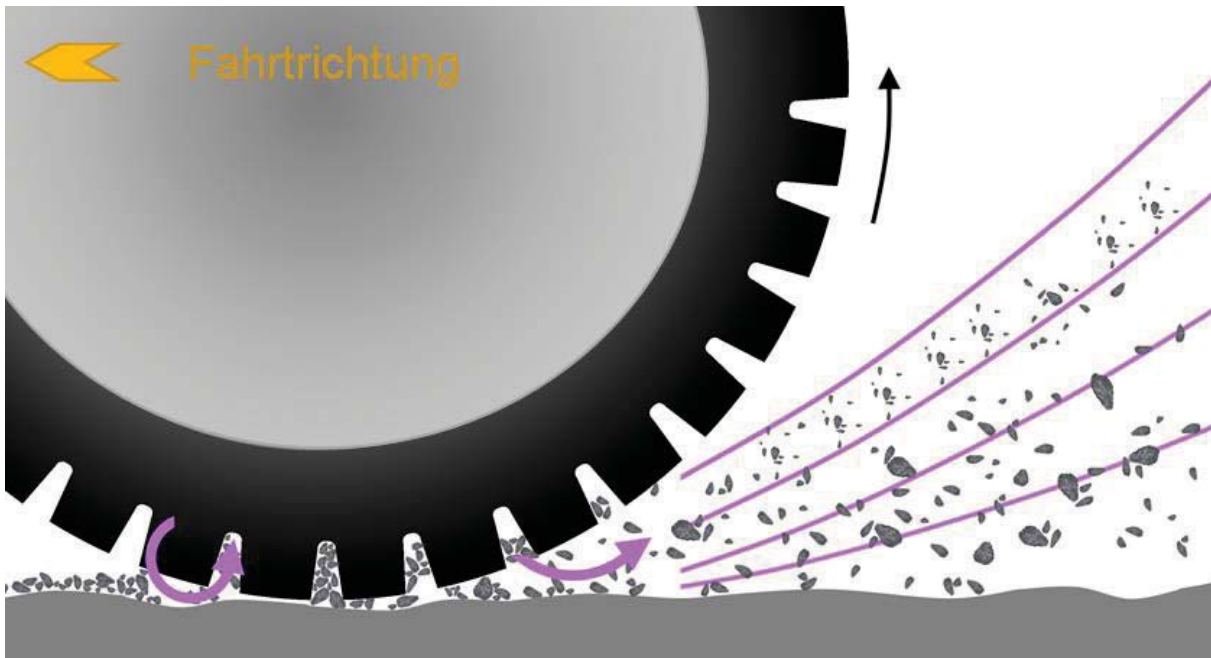


Abbildung 6.5: Darstellung „Schaufel-Effekt“ bei Schlupf durch Aufnahme und Abwurf der Steine aufgrund des Reifenprofils

Bei der Untersuchung zum Einfluss der Beschleunigung wurde der Reifenschlupf als signifikanter Parameter identifiziert. Durch den Reifenschlupf werden die Steine in Längsrichtung zum Fahrzeug beschleunigt und bekommen eine negative Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung, jedoch nimmt die z-Komponente aufgrund der Gewichtskraft ab und somit kommt es zu einer Verringerung der Aufprallhäufigkeit. Besonders wird dies in der Abbildung 5.12 in Kapitel 5.1.1.2 für den profillosen Reifen deutlich. Der Sommerreifen verhält sich bei Schlupf gegensätzlich zum profillosen Reifen, da eine Erhöhung des Reifenschlupfes dazu beiträgt, dass der „Schaufel-Effekt“ stärker wird. Der hier angenommene „Schaufel-Effekt“ bezieht sich nicht auf die Theorie der Schaufelrad-Wirkung durch den Reifenschlupf [10], sondern beschreibt den Aufnahme- und Abwurfmechanismus durch das Reifenprofil bei Schlupf (Abbildung 6.5). Dies wird bei der Betrachtung der Häufigkeit abgeworfener Steine durch das Profil bei gleichmäßiger Beschleunigung, wie in Abbildung 5.12, Kapitel 5.1.1.2 dargestellt, deutlich. Der profillose Reifen besitzt diesen Effekt hingegen nicht und zeigt deshalb ein anderes Bild bei der Häufigkeit abgeworfener Steine. Dieser Effekt belegt die Hypothese, dass kleine Steine vom angetriebenen Reifen abgeworfen werden, da der Reifen mit seinem Profil wie eine Schaufel wirkt.

6.2 Quantifizierung der Oberflächenschädigung

Ein zentrales Ziel dieser Arbeit war es, Korrelationen zwischen der Aufprallenergie abgeworfener Steine und der Schädigungsintensität der Lackoberfläche herzustellen. In den Fallturmversuchen konnten definierte Aufprallenergien erzeugt werden. Es galt nun, aus den Einschlagformen, die vom Flugobjekt im Fallturm abhängig von Energie und Auftreffwinkel erzeugt wurden, Informationen zu gewinnen, welche zur Aufstellung funktionaler Zusammenhänge zwischen den Schädigungsparametern, etwa ähnlich der Krupp'schen Panzerformel [42], genutzt werden könnten.

6.2.1 Charakterisierung der verschiedenen Einschlagsformen

Bei den Steinschlagversuchen im Fallturm ergaben sich Oberflächenschädigungen im Lackaufbau, die in acht verschiedenen Einschlagsformen unterteilt werden konnten. Die Einschlagsform zählt, wie die maximale Eindringtiefe, zu den wichtigen Schädigungsparametern und ist von Parametern wie Geschossaufbau, Auftreffwinkel und Rotation des Projektils abhängig. Die Einschlagsform liefert wichtige Informationen über den Verlauf des Aufpralls. Eine Unterteilung der Einschlagsformen nach verschiedenen visuellen Kriterien ist allerdings nur bei Dodekaeder-förmigen Projektilen möglich, da diese im Gegensatz zu Steinen regelmäßige und reproduzierbare Einschlagsformen erzeugen. Die Einschlagsform wird vorzugsweise durch die Parameter Auftreffwinkel und Aufprallenergie beeinflusst. Weiterhin spielt die Geometrie des Projektils eine Rolle, welche die maximale Eindringtiefe und die Schädigungsfläche bestimmt. Die verschiedenen beobachteten Einschlagsformen sind in Abb. 6.6 dargestellt.

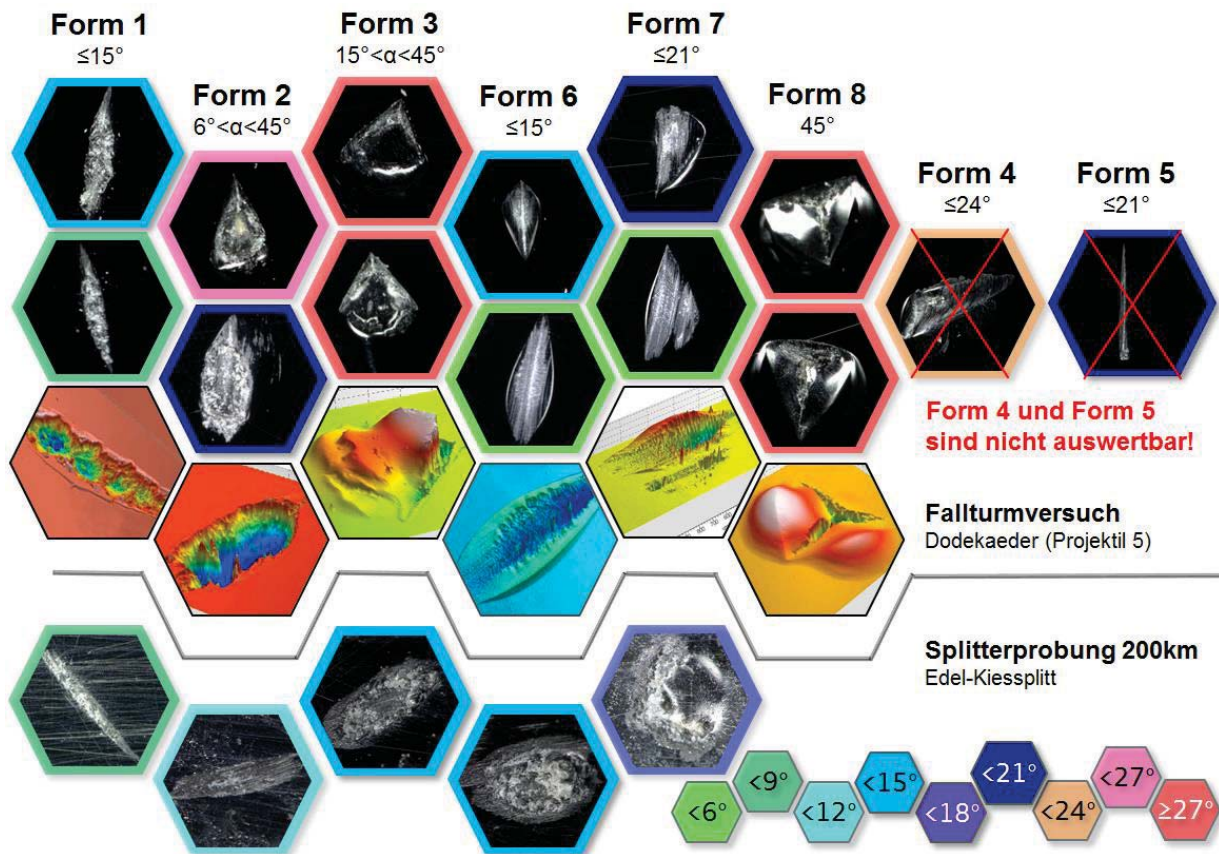


Abbildung 6.6: Klassifizierung der Schädigung in acht verschiedene Einschlagformen

6.2.1.1 Einschlagsform 1

Die Einschlagsform 1 beschreibt einen länglichen Einschlag, der schmal aber bis zu 15 μm tief ist (Abbildung 6.7). Der Dodekaeder als Projektil dringt mit der Spitzenecke oder einer Kante in die Lackoberfläche ein und streift entlang der Probenplatte weiter. Dabei ritzt die Spitze die Lackierung auf. Durch diesen Vorgang entsteht ein Riss-ähnlicher Kratzer auf der Lackschicht, der in der Mitte den tiefsten Punkt hat. Seitlich von dem Kratzer befindet sich eine leichte Materialaufwölbung. Solche Einschläge entstehen bei relativ kleinen Auftreffwinkeln bis zu 15° (Abbildung 6.8).

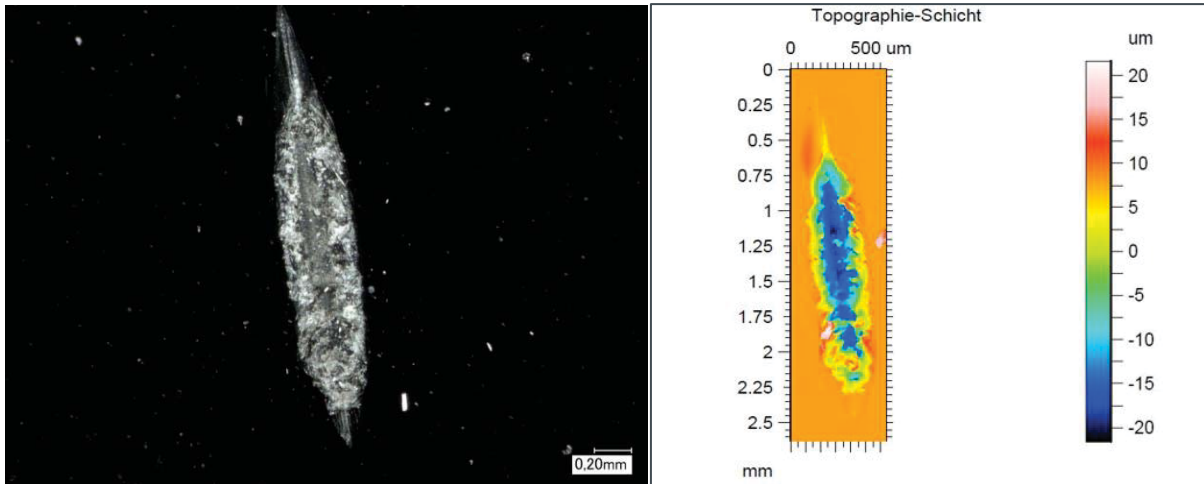


Abbildung 6.7: Einschlagsform 1 ist ein länglicher schmaler Kratzer, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop (links) und die dazugehörige 3D- Aufnahme mit dem Konfokalmikroskop (rechts). Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektile 5) bei einem Auftreffwinkel von 15° und 30 mJ Aufprallenergie.

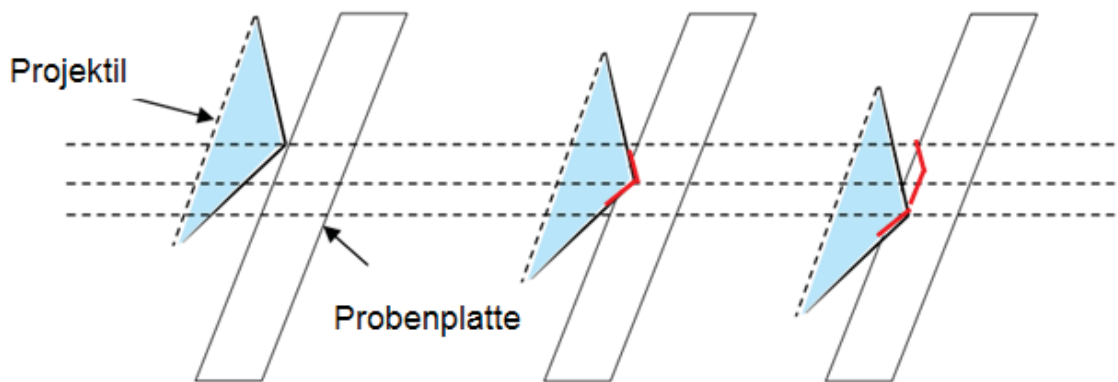


Abbildung 6.8: Theoretischer Ablauf des Aufprallmechanismus bei Einschlagsform 1. Die Spitze des Projektils dringt in die Beschichtung ein und streift dabei entlang der Probenplatte. Es entsteht ein Kratzer mit geringer Eindringtiefe.

6.2.1.2 Einschlagsform 2

Die Einschlagsform 2 ist die am häufigsten vorkommende Einschlagsform und entsteht bei allen Auftreffwinkeln von 6° bis 45° . Die Schädigung ist hierbei breit und kann in Abhängigkeit des Auftreffwinkels eine Eindringtiefe bis zum Substrat haben. Abbildung 6.9 gibt ein typisches Beispiel der Einschlagsform 2 (Auftreffwinkel von 21° bei Aufprallenergie von 30 mJ) mit dazugehörigem Schliffbild wieder. Die Schädigung geht bis zur Basislack-Schicht.

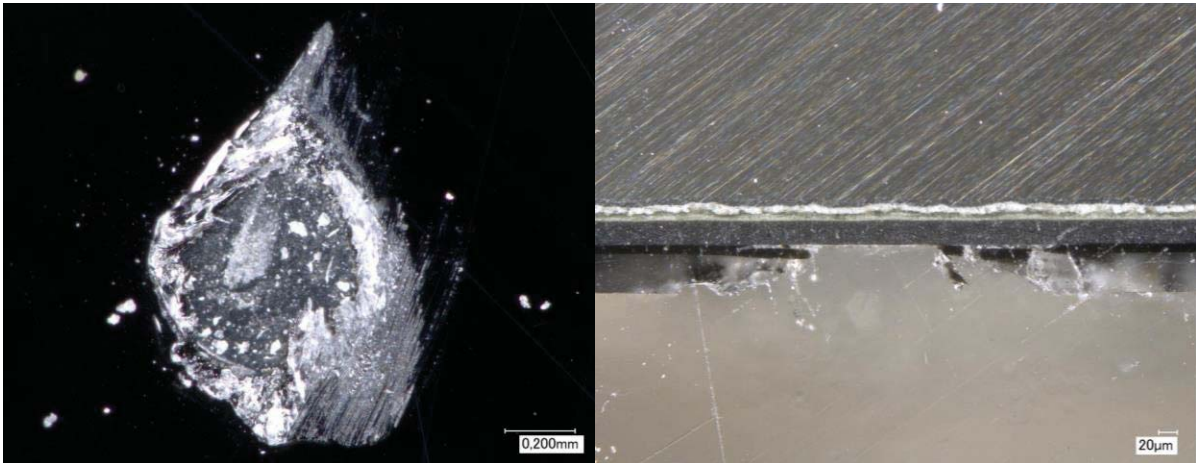


Abbildung 6.9: Einschlagsform 2 ist eine breite und sehr tiefe Schädigung, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop (links) und das dazugehörige Schiffsbild (rechts). Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei 21° Auftreffwinkel und bei 30 mJ.

Die Abbildung 6.10 zeigt den Aufprallvorgang mit einer Rotation des Projektils. Durch die Rotation wird die Schädigung vergrößert und durch das zusätzliche Ablättern der Lackschicht entstehen großflächige und tiefe Schädigungen, die typisch für die Einschlagsform 2 sind. Die Schädigungen der Form 2 eignen sich zur Analyse, da keine überdeckende Beschichtung, welche die Schädigung verdeckt, vorhanden ist.

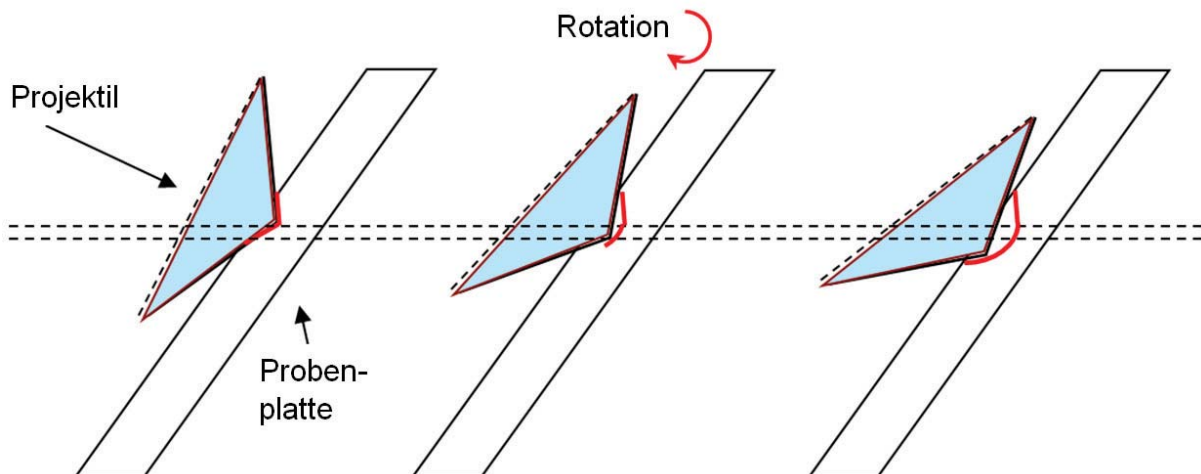


Abbildung 6.10: Theoretischer Ablauf des Aufprallmechanismus bei Einschlagsform 2. Die Spitze des Projektils dringt in die Beschichtung ein. Durch die Rotation des Projektils entsteht eine großflächige Schädigung der Lackschicht.

6.2.1.3 Einschlagsform 3

Die Einschlagsform 3 zeigt einen reinen Eckeinschlag des Dodekaeder-förmigen Projektils ohne Rotation auf die Probenplatte. Dadurch entsteht eine Materialverdrängung, deren Einschlagsform der eines gleichschenkligen Dreiecks ähnelt. Vorzufinden ist dieser Einschlagstyp bei Auftreffwinkeln zwischen 15° und 45° . Die Materialaufwölbung überdeckt die tiefste Stelle der Schädigung und erschwert die Messung der darunter tiefer liegenden Schädigung. Erst durch das Schlibbild (Abbildung 6.11) wird der Durchbruch der Beschichtung bis zur KTL-Schicht deutlich.

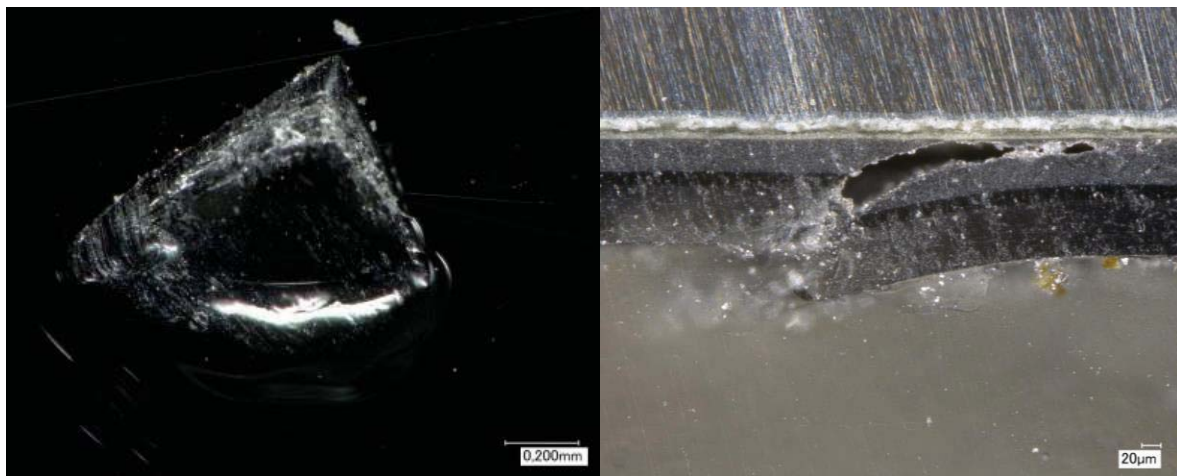


Abbildung 6.11: Einschlagsform 3 ist ein Eckeinschlag des Projektils ohne Rotation, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop (links) und das dazugehörige Schlibbild (rechts). Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei 30° Auftreffwinkel und 30 mJ Aufprallenergie.

6.2.1.4 Einschlagsform 4

Die Einschlagsform 4 (Abbildung 6.12) hat die Form eines breiten Dreiecks und ist bei größeren Auftreffwinkeln bis 45° vorzufinden. Das Projektil trifft ohne Rotation im schrägen Winkel mit der Kante auf die Beschichtung. Dabei verkantet das Projektil in der Beschichtung, sodass ein tiefer Einschlag mit einseitiger Materialaufwölbung entsteht. Die Einschlagsform 4 wird aufgrund des Mangels an Vergleichbarkeit nicht ausgewertet.



Abbildung 6.12: Einschlagsform 4 ist ein Kanteneinschlag des Projektils ohne Rotation, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop. Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei 21° Auftreffwinkel und 30 mJ Aufprallenergie.

6.2.1.5 Einschlagsform 5

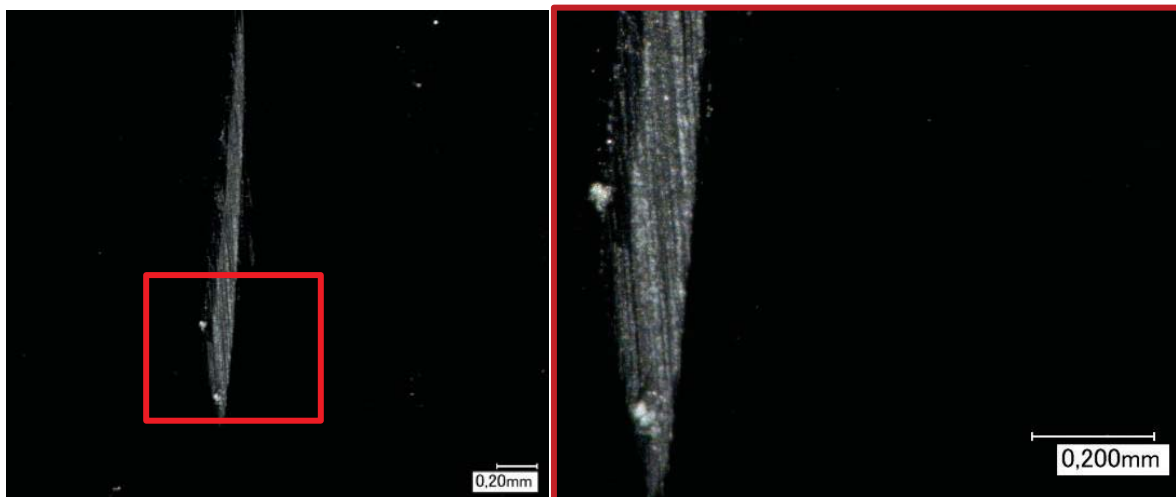


Abbildung 6.13: Einschlagsform 5 ist ein oberflächlicher Kratzer mit geringer Eindringtiefe, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop. Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei einem Auftreffwinkel von 21° und einer Aufprallenergie von 30 mJ.

Die Einschlagsform 5 (Abbildung 6.13) ist ein langer linienförmiger Kratzer mit geringer Eindringtiefe. Das Projektil trifft mit der Kante auf die Probenplatte: Dadurch entsteht nur eine ganz dünne Linie. Die Einschlagsform 5 unterscheidet sich von der Form 1 durch die Länge, Tiefe und Ritzrichtung, da die Ritzrichtung bei Form 1 parallel zu Fallrichtung ist. Da die Schädigungen der Form 5 nur sehr oberflächlich sind, wurden Versuche mit derartigem Schadensbild nicht weiter ausgewertet.

6.2.1.6 Einschlagsform 6

Die Form 6 beschreibt einen Einschlag des Projektils Dodekaeder auf der Ecke ohne Rotation (Abb. 6.14). Diese Einschlagsform entsteht bei kleinen Auftreffwinkeln bis zu 15° . Der Dodekaeder trifft im flachen Winkel mit der Ecke auf eine große Fläche der Beschichtung. Die Eindringtiefe in die Probenplatte ist trotz größerer Schädigungsfläche gering. Der Aufprallmechanismus ist vergleichbar mit der Einschlagsform 1. Der Unterschied liegt vermutlich im Kraftarm. Wie in Abbildung 6.15 dargestellt, gibt es zwei mögliche Szenarien für den Kraftarmeffekt. Das Projektil trifft jeweils mit einem Eck auf die Probenplatte. Je kürzer dabei der Kraftarm ist, desto größer ist der Widerstand und die dabei entstehende Schädigung.

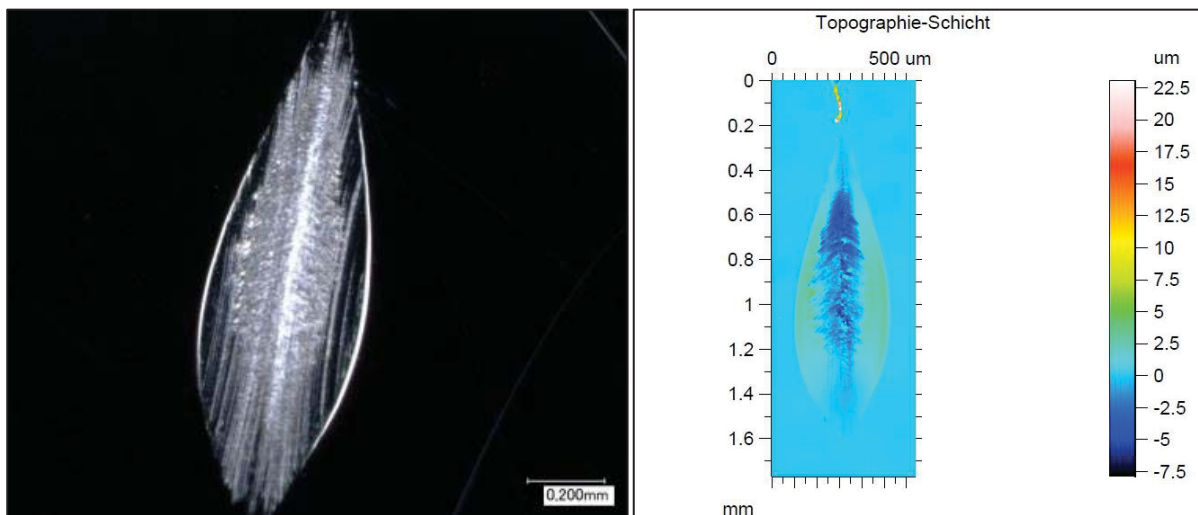


Abbildung 6.14: Einschlagsform 6 ist eine großflächige Schädigung mit geringer Eindringtiefe, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop (links) und die dazugehörige 3D-Aufnahme mit dem Konfokalmikroskop (rechts). Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei 6° Auftreffwinkel und bei 30 mJ.

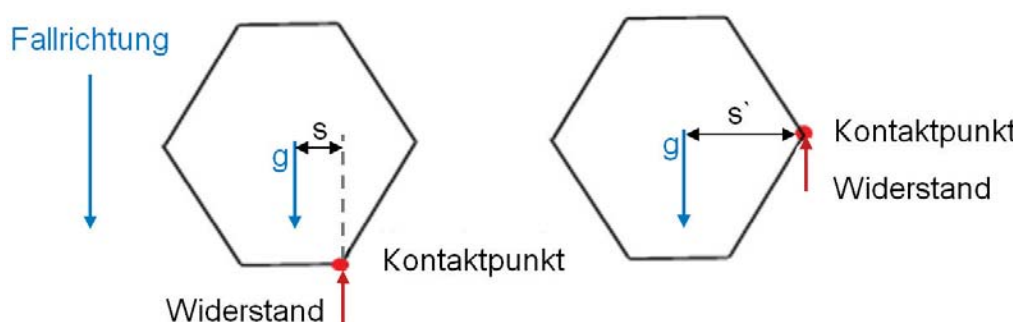


Abbildung 6.15: Theorie des Kraftarmeffekts der Projektile. Ein kürzerer Kraftarm führt zu einer größeren Schädigung der Lackschicht.

6.2.1.7 Einschlagsform 7

Diese Schädigungsform ist eine Variation der Form 6, bei der anstelle der Ecke die Kante des Projektils mit einem Winkel auf die Horizontalebene der Probenplatte trifft. Die Form 7 (Abbildung 6.16) hat wie die Form 6 eine große Schädigungsfläche bei geringer Eindringtiefe.

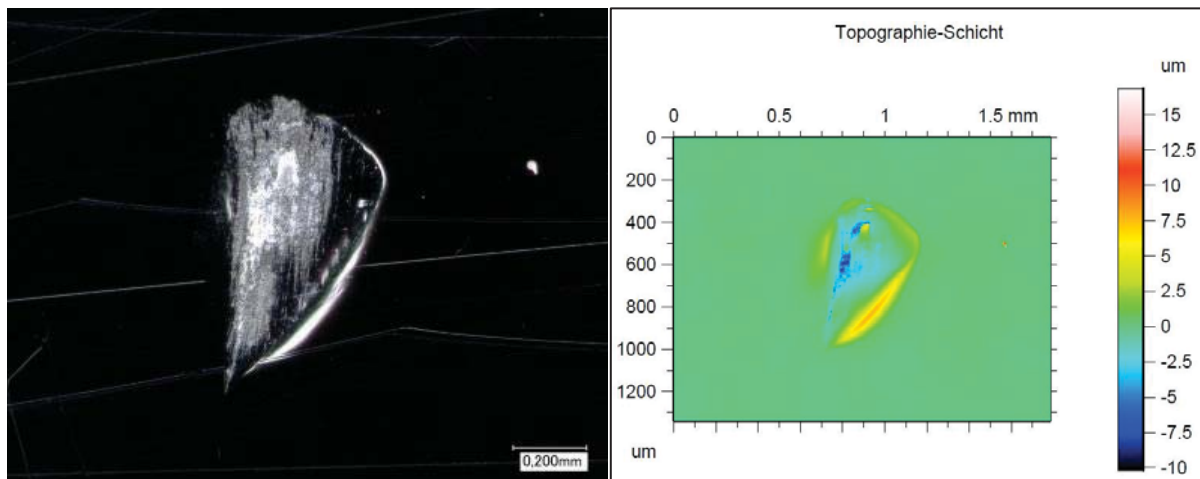


Abbildung 6.16: Einschlagsform 7 ist eine Variation der Form 6, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop (links) und die dazugehörige 3D- Aufnahme mit dem Konfokalmikroskop (rechts). Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei 21° Auftreffwinkel und bei 30 mJ.

6.2.1.8 Einschlagsform 8

Die Abbildung 6.17 zeigt ein Beispiel der Einschlagsform 8, die bei einem Auftreffwinkel von 45° und einer Aufprallenergie von 30 mJ entstand. Die Lackschicht, die KTL- und die Zinkschicht wurden durch den Aufprall verformt und durchbrochen. Bei dem Vorgang wurde die Beschichtung nach außen gepresst und aufgewölbt. Dabei entsteht unter der Wölbung ein Hohlraum wie in dem Schliffbild zu erkennen. Die Form 8 ist die typische Einschlagsform eines Dodekaeders. Der Einschlag entspricht der Form eines Tetraeders. Um den Einschlag herum sind Erhebungen, die durch Materialverschiebung der Lackoberfläche entstanden. Bei dem Aufprall dringt das Projektil in die Beschichtung ein. Die Form 8 eignet sich hervorragend, um Beziehungen zwischen Eigenschaften der Beschichtung und möglichen maximalen Eindringtiefen zu ermitteln.

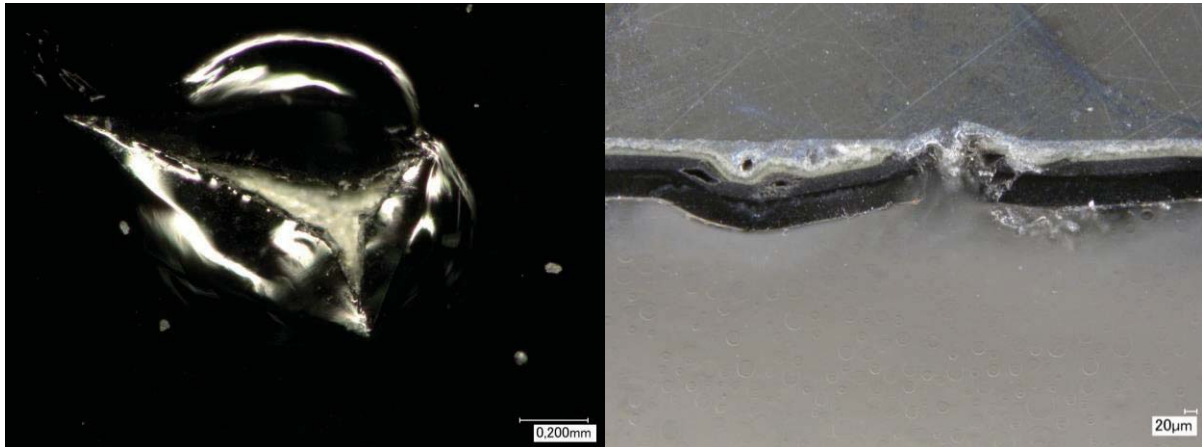


Abbildung 6.17: Einschlagsform 8 entspricht der Form eines Tetraeders, aufgenommen mit dem Licht-Mikroskop (links) und das dazugehörige Schlibfbild (rechts). Fallturmversuch mit Dodekaeder (Projektil 5) bei einem Auftreffwinkel von 45° und einer Aufprallenergie 30 mJ.

6.2.1.9 Verteilung der Einschlagsformen

Die Verteilung der verschiedenen Einschlagsformen in Abhängigkeit des Auftreffwinkels und der Eindringtiefe bei dem Dodekaeder (Projektil 5) in die Beschichtung ist in Abbildung 6.18 dargestellt.

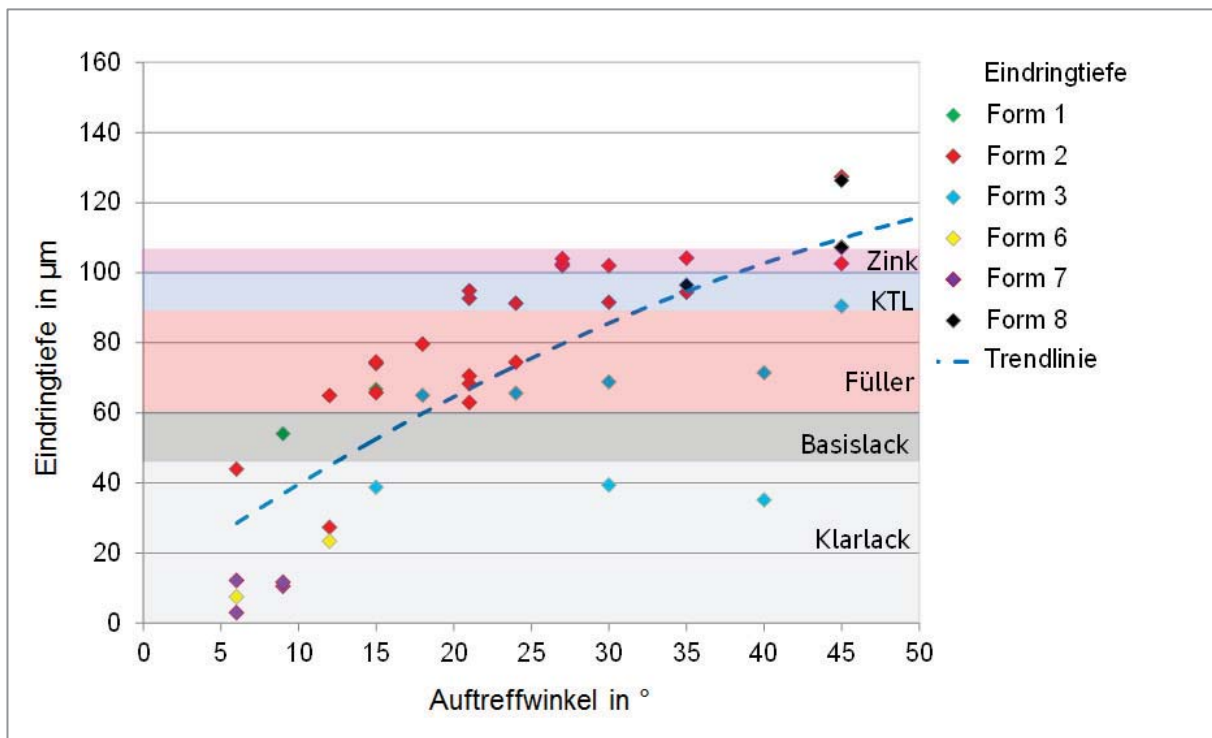


Abbildung 6.18: Verteilung der verschiedenen Einschlagsform in Abhängigkeit des Auftreffwinkels und der Eindringtiefe bei dem Dodekaeder (Projektil 5) mit einer Energie von 30 mJ. Die Einschlagsform 1,2 und 8 haben die größten Eindringtiefen.

Anhand dieser Darstellung wurde deutlich, dass die Einschlagsform 2 die am häufigsten vorkommende Einschlagsform bei Auftreffwinkeln von 5° bis 45° ist. Bei Auftreffwinkeln von 45° können Schädigungen bis zum Grundmaterial entstehen, wie an den Beispielen der Einschlagsformen 2 und 8 zu erkennen ist. Die Einschlagsformen 6 und 7 hingegen weisen nur oberflächliche Schädigungen im Klarlack auf. Auch die Einschlagsform 3 ist bei Auftreffwinkeln zwischen 15° und 45° wiederzufinden. Jedoch wird bei dieser Einschlagsform 3, die tiefste Stelle der Schädigung durch die Materialaufwölbung überdeckt und erschwert somit die Messungen. Die Einschlagsformen 1, 2 und 8 weisen hingegen ein eindeutiges Schädigungsbild auf und wurden daher in der Abbildung 6.19 näher betrachtet. In dieser Darstellung wird durch den annähernd linearen Verlauf der Trendlinie der Einfluss des Auftreffwinkels auf die Eindringtiefe des Projektils in die Beschichtung verdeutlicht. Dies bestätigt die Annahme aus der Steinschlagsimulation, dass je größer der Auftreffwinkel ist, bei dem ein Stein auf die Karosserieaußenhaut trifft, desto größer ist auch die Schädigung der Lackoberflächen.

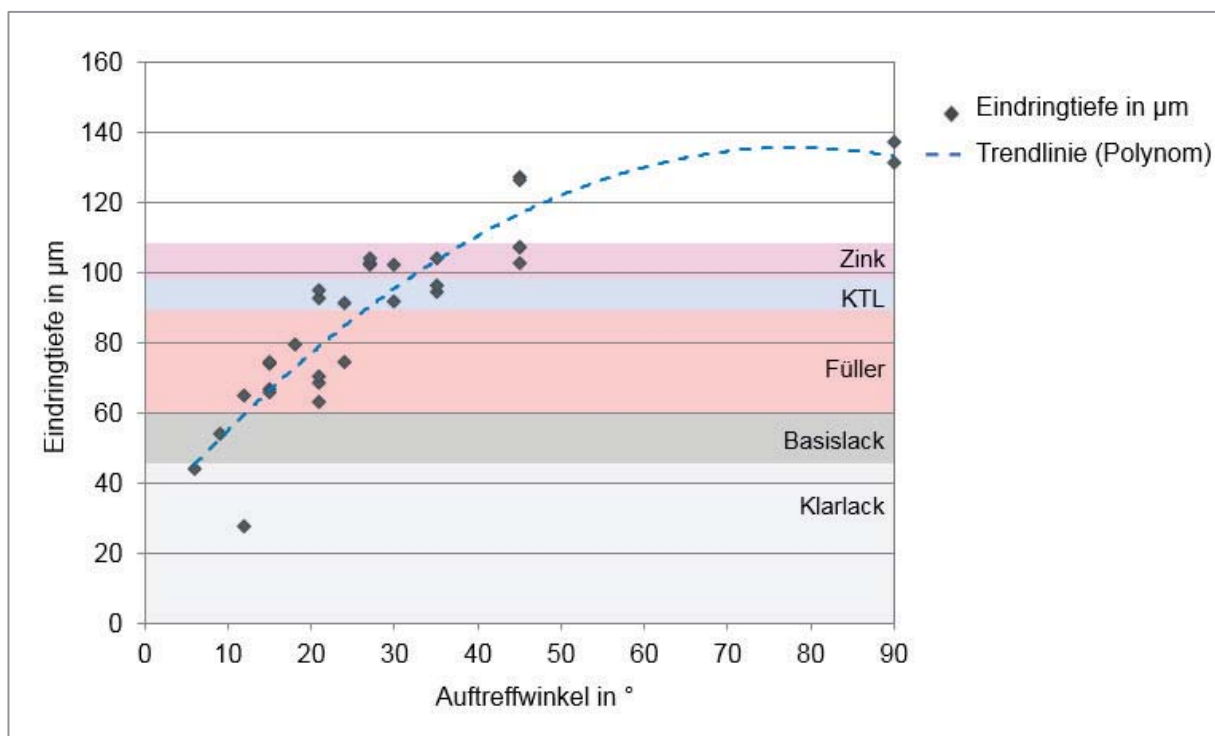


Abbildung 6.19: Verteilung der Einschlagsform 1,2 und 8: Einfluss der Auftreffwinkel auf die maximale Eindringtiefe bei 30 mJ mit dem Dodekaeder (Projektile 5)

6.2.2 Anwendung der Panzerformel in der Steinschlagauswertung

Beim Steinschlagvorgang ist die Kompression und Trennung der Lackierung aus der Sicht der Mechanik vergleichbar mit dem Einschlag eines Vollmantelgeschosses auf ein Stahlblech bzw. einen Panzer. Deshalb kann aus der beschriebenen Panzerformel in Kapitel 2.5.5 ein neues Modell entwickelt werden, um Schädigungen durch Steinschlag bei definierten Bedingungen mathematisch zu beschreiben. Zur Vereinfachung wird dabei angenommen, dass alle Lackschichten homogen sind. Daraus ergibt sich folgende Gleichung (6.1), welche die Schädigungstiefe durch Steinschlag auf lackierten Substraten beschreiben soll:

$$S_b^{0,7} = \frac{m^{0,5} \cdot v}{A \cdot d^{0,75}} \cdot k \quad (6.1)$$

Hierbei ist S_b die maximale Schädigungstiefe in μm des Steins in der Lackschicht mit der Dicke d in μm . m ist die Masse des Steins in g, und v die Auftreffgeschwindigkeit in m/s. Der Faktor A ist wie bei der in Kapitel 2.5.5 beschriebenen Panzerformel ein empirischer Faktor, der hier von der Eigenschaft der Lackierung abhängig ist. Zur Vereinfachung der Berechnung mit der Panzerformel wird A der Wert $\approx 0,1$ zugeordnet. Dieser Wert bildet das Verhältnis der Festigkeit von Stahl zu Acryl ab. Zudem wird die Formel um den Faktor k erweitert, um die Annäherung an ein reales Schädigungsverhalten der Steine zu erhalten. Hierbei werden die Form des Körpers und sein Material berücksichtigt. Des Weiteren soll der Faktor k so berechnet werden, dass alle Werte mit den Einheiten μm und g eingegeben werden können. Dieser Faktor wird in Abbildung 6.21 experimentell so bestimmt, dass die berechnete Kurve sich an das reale Schädigungsverhalten des Prüfkörpers annähert. Das Schädigungsverhalten wurde durch Fallturmversuche in Kapitel 5.2.5 analysiert.

Um die Abweichungen vom Auftreffwinkel zu berechnen, wird analog zur Formel 2.30 folgende Zusatzformel (6.2) eingeführt:

$$S_a = S_b \cdot \cos^n \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \quad (6.2)$$

Im Falle dieser Arbeit musste der Exponent n noch durch geeignete Versuchsreihen bestimmt werden. Der Auftreffwinkel beschreibt in diesem Fall den Winkel zwischen

Flugrichtung und Probenplatte. Der Unterschied zwischen dem Auftreffwinkel α und β aus der Panzerformel und beim Steinschlagvorgang wird in der Abbildung 2.20 dargestellt.

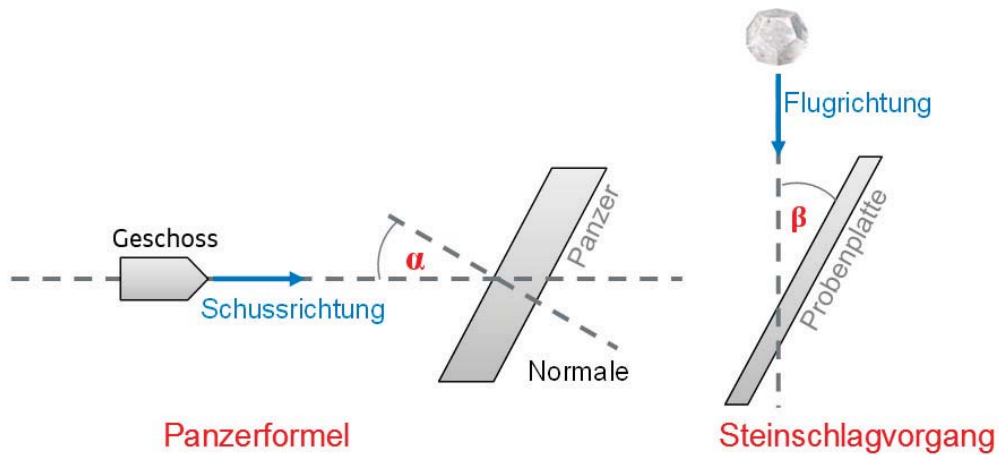


Abbildung 6.20: Darstellung des Auftreffwinkels α und β bei der Panzerformel sowie beim Steinschlagvorgang

In Abbildung 6.21 werden die berechneten Kurven exemplarisch auf Basis der Gleichung 6.2 wiedergegeben. Hierbei sind die Einflüsse von den Faktoren n und k aufgetragen. Der k -Wert beeinflusst nur die maximale Eindringtiefe, während der n -Wert die Abhängigkeit der Eindringtiefe vom Auftreffwinkel des Projektils bestimmt.

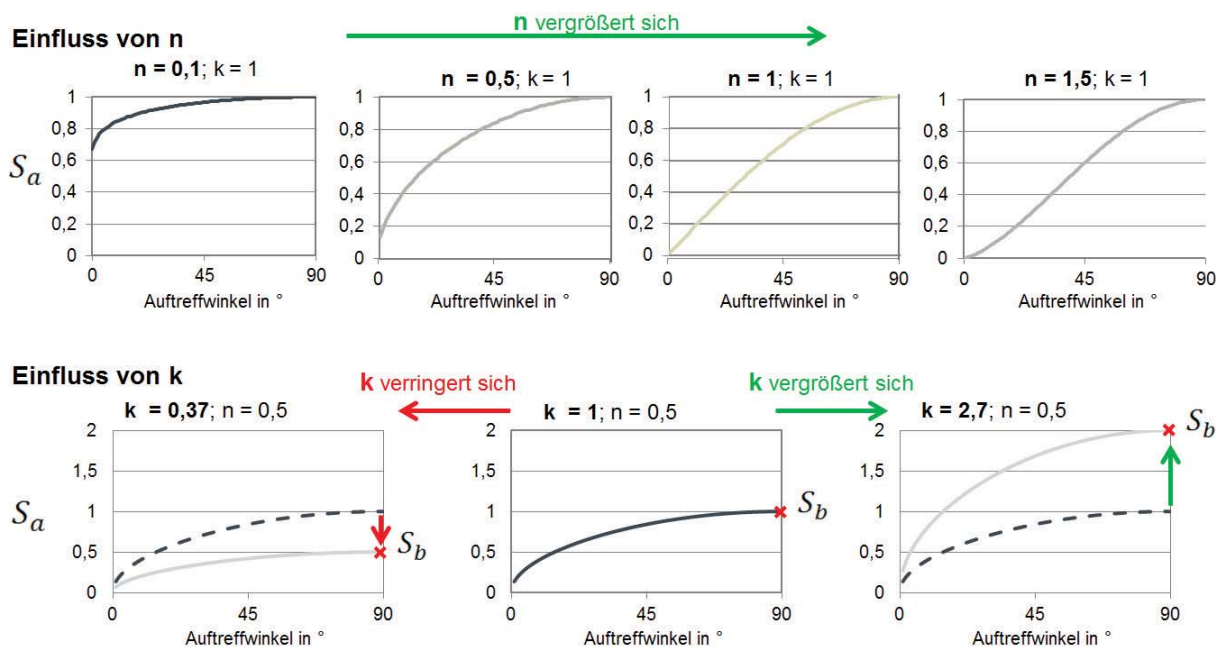


Abbildung 6.21: Einflüsse n - und k -Werte auf den Kurvenverlauf für das Schädigungsverhalten

6.2.2.1 Entwicklung einer Steinschlagformel

Im vorherigen Kapitel wurde bereits ein Modell entwickelt, um die Schädigung der Steinschläge zu beschreiben. Dieses Kapitel behandelt die Bestimmung der empirischen Faktoren n und k basierend auf den Messdaten für die Prüfkörper Stein und Dodekaeder.

6.2.2.2 Anwendung der modifizierten Panzerformel beim Projektil Stein

Wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben, beeinflusst der n -Wert die Beziehung zwischen Auftreffwinkel und Schädigungstiefe. In der Abbildung 6.22 sind die Kurvenverläufe gezeigt, die sich bei n -Werten von 0,1 bis 2 mit einer Schrittweite von 0,1 sowie Winkeln von 1 bis 90° ergeben. Die effektive Schädigungstiefe S_a [μm] ist abhängig von n und dem Auftreffwinkel β des Steins.

Bei einem Faktor n von 0,5 und einem Auftreffwinkel von 40° ergibt sich eine errechnete Schädigungstiefe von $S_a = 0,8 \cdot S_b$.

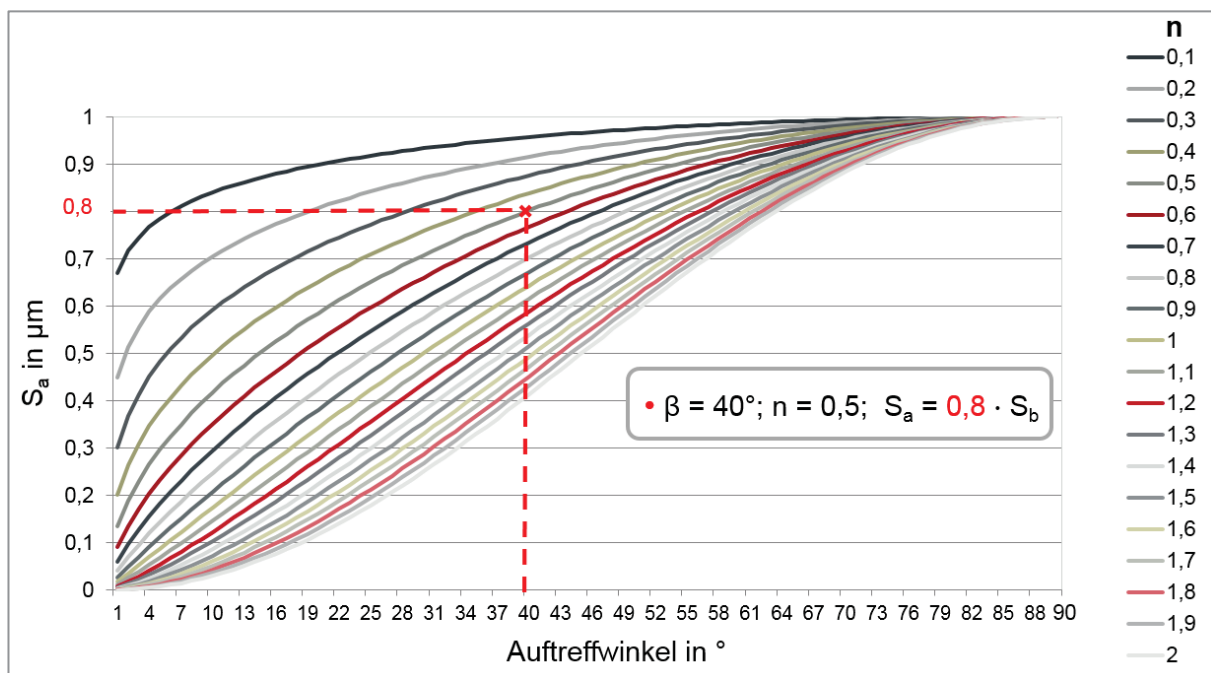


Abbildung 6.22: Abhängigkeit der maximalen Eindringtiefe vom Auftreffwinkel bei verschiedenen n -Werten

Den zum Teil erheblich streuenden Schädigungstiefen, die in den Fallturmversuchen bei konstanter Masse und Fallhöhe (konstanter Aufprallenergie) abhängig vom Auftreffwinkel gemessen wurden (Abb. 6.23), kann polynomisch eine Trendlinie zugeordnet werden. Diese Trendlinie (blau gestrichelt) wird durch die funktionale

Beziehung gemäß Gleichung 6.1 sowie 6.2 am besten durch die rote Kurve angenähert, die sich bei den empirischen Faktoren $n = 0,5$ und $k = 1,7$ ergibt. Somit können diese Faktoren verwendet werden, um die Schädigungstiefe von Steinen zu berechnen. Daraus ergeben sich Gleichung 6.3 und 6.4:

$$S_b^{0,7} = \frac{m_G^{0,5} \times v}{0,1 \times d^{0,75}} \times 1,7 \quad (6.3)$$

$$S_a = S_b \cdot \cos^{0,5} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \quad (6.4)$$

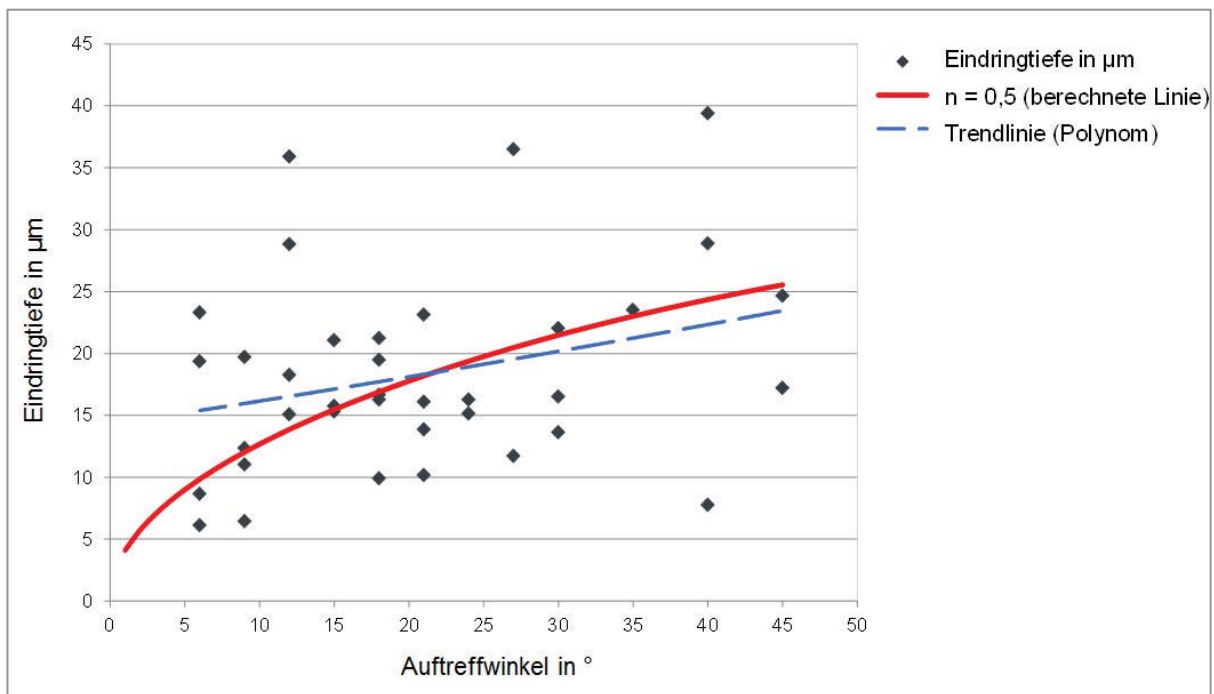


Abbildung 6.23: Einfluss des Auftreffwinkels eines Steins auf die Eindringtiefe bei einer Aufprallenergie von 27 mJ. Bei $n = 0,5$ nähert sich der nach Gleichung 6.1 errechnete Kurvenverlauf (rot) der Trendlinie (blau).

6.2.2.3 Anwendung der modifizierten Panzerformel bei Dodekaeder-förmigen Projektilen

Mithilfe der Versuchsergebnisse aus der fünften Versuchsreihe „Einfluss des Auftreffwinkels von 90° mit Dodekaeder-förmigen Projektilen zur Bestimmung des empirischen Faktors k “ (siehe Kapitel 5.2.5) können die empirische Faktoren n und k bestimmt werden. Die für verschiedene k -Werte errechneten funktionalen Zusammenhänge zwischen Aufprallenergie und maximaler Eindringtiefe sind in

Abbildung 6.25 wiedergegeben. Hieraus kann $k = 2,3$ als ein sinnvoller Mittelwert gewonnen werden, der eine gute Annäherung an die Messdaten aufweist.

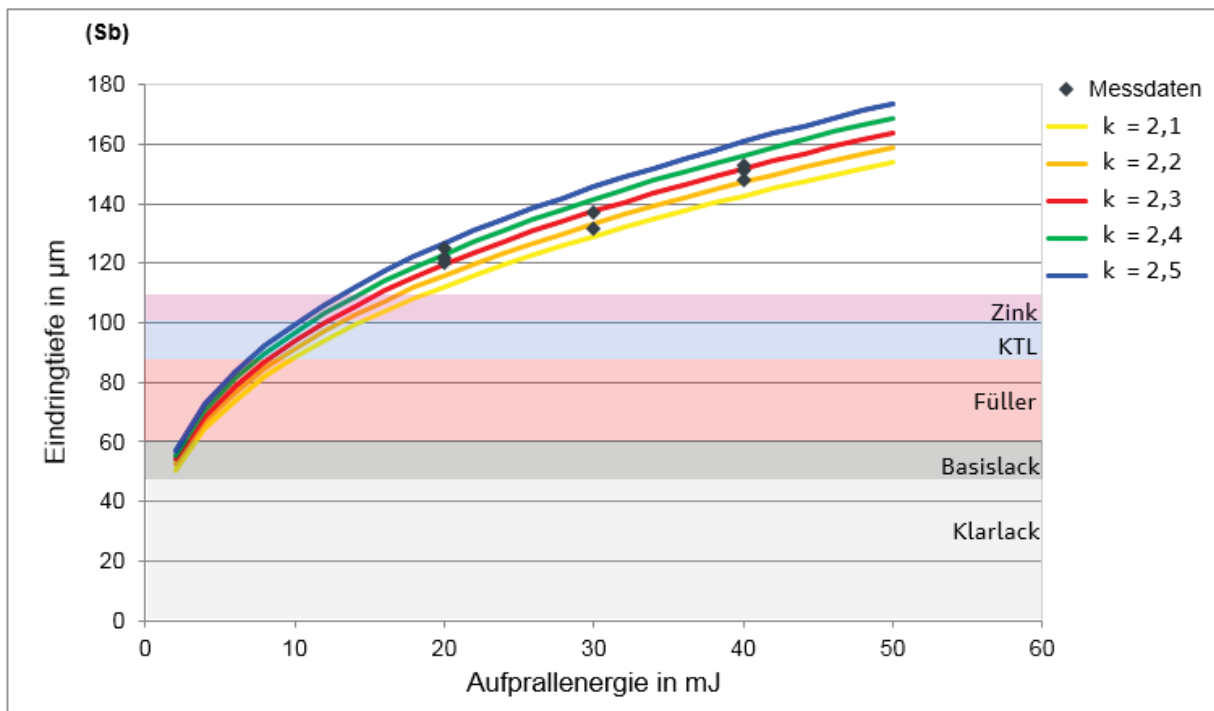


Abbildung 6.25: Einfluss der Aufprallenergie auf die maximale Eindringtiefe bei verschiedenen k -Werten

Beim Einsatz des k -Wertes in die Gleichung 6.1 ergibt sich die maximale Eindringtiefe S_b bei gegebener Aufprallenergie. In Tabelle 6.4 sind berechnete und gemessene Eindringtiefen in Abhängigkeit von der Aufprallenergie (20, 30 und 40 mJ) gegenübergestellt. Man erkennt, dass die berechneten und gemessenen Werte vergleichbar sind und die angewendeten funktionalen Zusammenhänge die Realität bis zu einer Abweichung von bis 2% wiedergeben.

Tabelle 6.4: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Eindringtiefen in Abhängigkeit von der Aufprallenergie

Aufprallenergie in mJ	Eindringtiefe in µm	
	S_b Berechnet nach Gl. 6.1	Gemessen
20	119,5	122,4
30	137,3	134,3
40	151,7	150,5

Die berechnete Schichtdicke bei 30 mJ wird in die Gleichung (6.4) eingesetzt und der n -Wert von 0,1 bis 2 mit der jeweiligen Kurve dargestellt, damit die berechnete Linie sich möglichst an die Trendlinie aus den Versuchen annähert. Dabei ist zu beachten, dass nur die Messdaten der Einschlagsform 1, 2 und 8 aus der Abbildung 6.19 als reale Schädigungswerte verwendet werden. In der folgenden Abbildung 6.26 werden die Ergebnisse der Kurvenverläufe $n = 0,5$ (rote Linie), $n = 0,7$ (graue Linie) und die Trendlinie (blau gestrichelte Linie) aus der Versuchsreihe mit dem Dodekaederförmigen Projektils, bei 30 mJ Aufprallenergie dargestellt. Hierbei erkennt man, dass der Kurvenverlauf $n = 0,5$ und die Trendlinie der Versuchsreihe korrelieren.

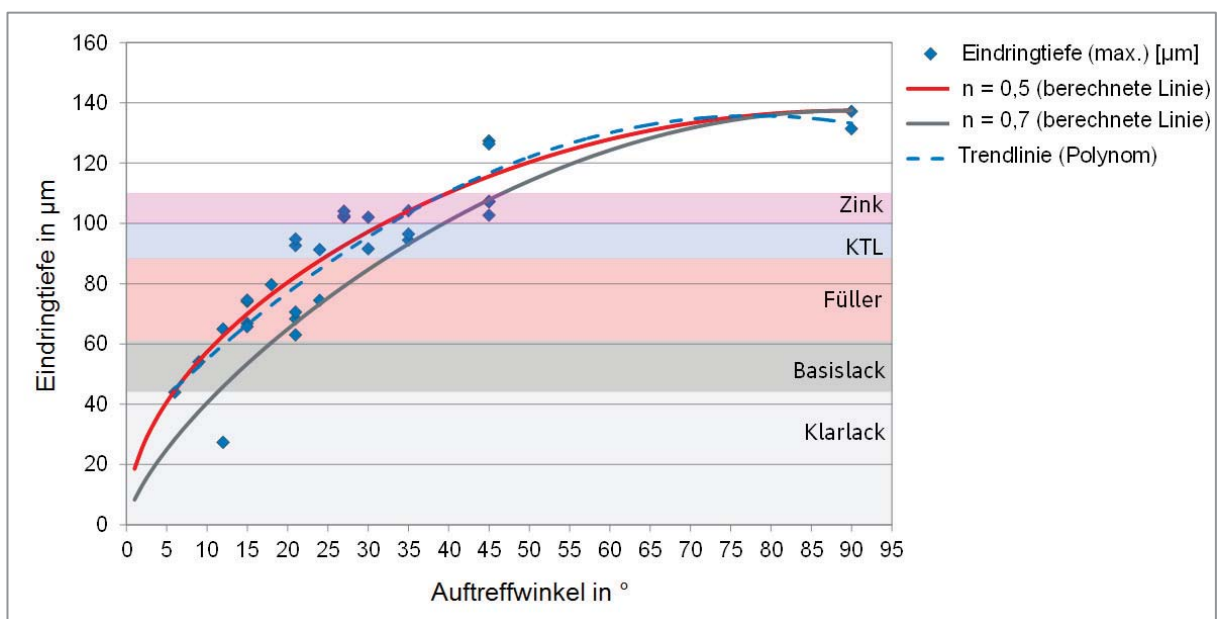


Abbildung 6.26: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Kurvenverläufe $n = 0,5$ (rote Linie), $n = 0,7$ (graue Linie) und die Trendlinie (blau gestrichelte Linie)

Die Gleichung (6.4) vereint die Schädigungstiefe mit der Aufprallenergie und dem Auftreffwinkel. Um diese Beziehung besser darzustellen, wird eine 3D-Darstellung verwendet (siehe Abbildung 6.27).

Bei der Darstellung der Grafik ist der Auftreffwinkel von 0 bis 90° der auf y-Achse aufgetragen, während die Aufprallenergien auf der x-Achse aufgetragen sind. Die entsprechenden Eindringtiefen befinden sich auf der z-Achse.

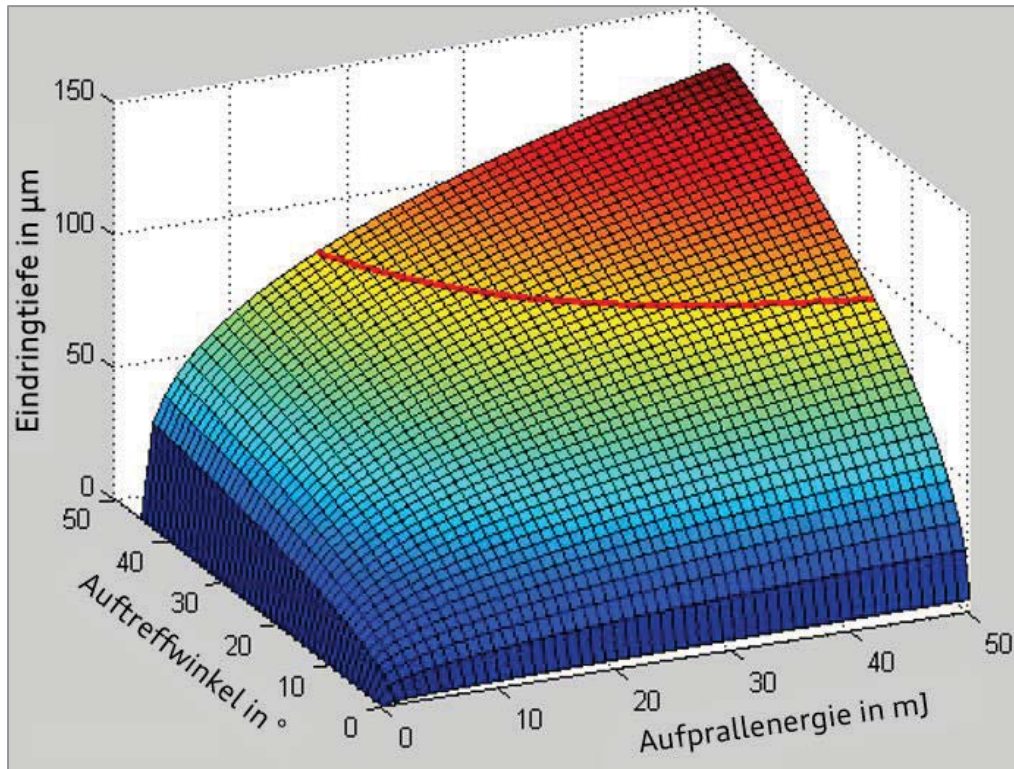


Abbildung 6.27: Abhängigkeit der maximalen Eindringtiefe von Auftreffwinkel und Aufprallenergie

Die rote Linie dient als exemplarische Beschreibung für die Eindringtiefe bei 90 µm und stellt die Beziehung von Auftreffwinkel und der Aufprallenergie dar, welche in Abbildung 6.28 näher erläutert wird. In diesem Beispiel können Steine mit einer Aufprallenergie von 30 mJ und bei Auftreffwinkeln von größer als 25° Schädigungen produzieren, die bis auf das Substrat alle Lackschichten durchdringen. Diese Schädigungen haben ein großes Korrosionspotential, da Eindringtiefen >90 µm die KTL-Schicht und sogar die Zink-Schicht, welche dem Korrosionsschutz dient, beschädigt.

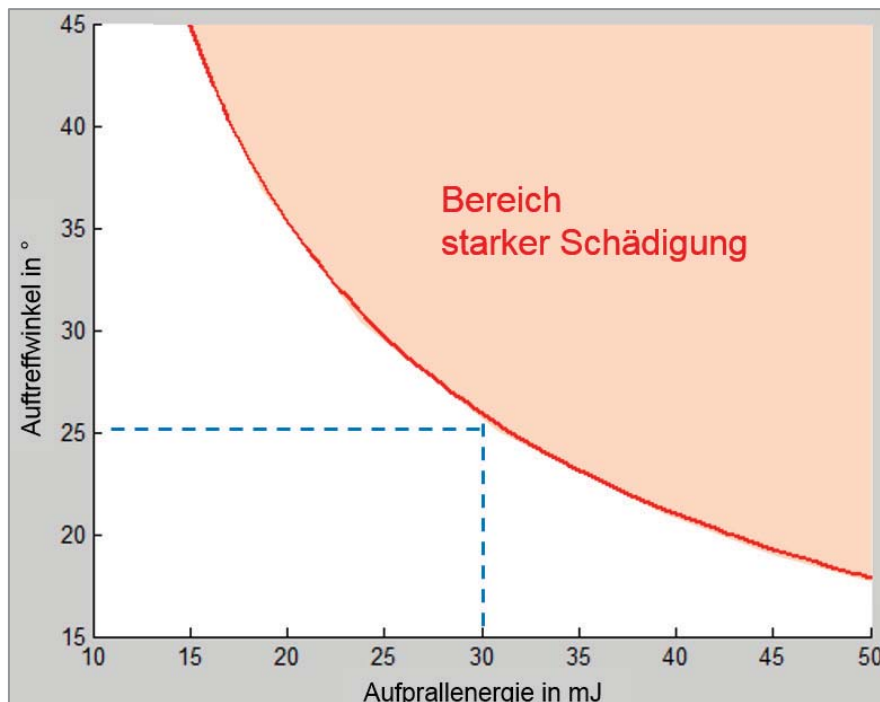


Abbildung 6.28: Begrenzungslinie für Eindringtiefen >90 µm: Hohes Korrosionspotential (roter Bereich) oberhalb der Begrenzungslinie

Zusammenfassend wurde in diesem Kapitel 6.2.3 die Panzerformel soweit modifiziert bzw. erweitert, so dass eine Steinschlagformel entstanden ist, mit deren Hilfe die Schädigung beschrieben werden kann. Der Gültigkeitsbereich dieser Formel beschränkt sich in diesem Zusammenhang auf Steine bzw. Prüfkörper mit scharfen Ecken wie z.B. der Prüfkörper Dodekaeder, der in dieser Arbeit verwendet wurde.

6.3 Weiterentwicklung der Steinschlagsimulation

In dem folgenden Kapitel wird die Weiterentwicklung des Steinschlagsimulationstools „Pebbles II“ beschrieben. Die Erkenntnisse aus den Aufnahmen der Versuchsfahrten und die Ergebnisse aus den Fallturmversuchen fließen hierbei in die neue Pebbles-Applikation ein.

6.3.1 Steinschlagsimulationstool

Ausgehend der Auftreffwinkel aus den Ergebnissen der Steinschlagsimulation wurden die Schädigungsbilder der Fahrzeuge aus den zahlreichen Splitterprobungen (200 km) und zusätzlich die Ergebnisse aus den Fallturmversuchen in eine neue Pebbles-Applikation zusammengeführt. Ziel war es, die Ergebnisse der Steinschlagversuche über die Schädigung eines Fahrzeuges zu verwalten und im Kontext einer aktuellen Simulation anzuzeigen. Zusätzlich wurden Bewertungskriterien in Form von

Grenzwertfunktionen des Auftreffwinkels definiert, um für Bewertungen in der Steinschlagsimulation herangezogen werden zu können.

Die Schädigung des Fahrzeuges wurde anhand einer Gitterstruktur, die in der x-z-Ebene aufgespannt ist, dokumentiert. Für jeden Gitterpunkt wurden die folgenden Informationen festgehalten:

- x-z-Koordinaten
- Material
- Oberfläche
- Auftreffwinkel
- Schädigung

Darüber hinaus können die Ergebnisse aus den Fallturmversuchen im Simulationsprogramm herangezogen und die Versuchsdaten über eine Datenbank von Oracle verwaltet werden.

6.3.1.1 Bewertung der Schädigung

Zu einer Steinschlagsimulation können dem Anwender nun empirische Versuchsdaten über die zu erwartende Schädigung zum Vergleich angeboten werden. Hierzu werden Vergleichsdaten der gleichen Fahrzeugklasse und Ergebnisse aus den Fallturmversuchen angezeigt. Die Schädigung wird in Abhängigkeit von Material, Oberfläche und Fahrzeugklasse einer Steinschlagsimulation zugeordnet. Nach Aufruf der Schädigungsanalyse werden jene Gitterpunkte mit ihrem Schädigungskennwert in der x-z-Ebene angezeigt, für die eine Schädigungsprognose verfügbar ist. Bei Auswahl eines Gitterpunktes kann sich der Anwender entweder passende Erprobungsergebnisse oder Fallturmexperimente anzeigen lassen.

Für den Vergleich mit den Ergebnissen aus der Erprobung wird zunächst eine Liste der hierfür verfügbaren Fahrzeugklassen (Vergleichsprojekte) erstellt. Ist zu einem Fahrzeugprojekt und der betrachteten Fahrzeugkoordinate ein Bild hinterlegt, so kann dieses durch Auswahl des Projektes angezeigt werden. Zur Selektion der passenden Fallturmversuche können durch eine Suchmaske die Ergebnisse der gewünschten Fallturmexperimente angezeigt werden.

6.3.1.2 Steinschlagbewertung mithilfe von positionsabhängigen Grenzwerten zum Auftreffwinkel

Bei der Bewertung einer Steinschlagsimulation anhand des Auftreffwinkels kann der zulässige Grenzwert in Abhängigkeit von der Position des betrachteten Treffpunktes in der x-z-Ebene festgelegt werden. Für jedes z lässt sich der Grenzwert dann in Form einer Grenzlinie angeben. Diese Grenzlinie ist abhängig vom betrachteten Material und der Oberfläche. Jede Grenzlinie wird für ein z-Intervall definiert. Die Kombination der Grenzlinien für mehrere z-Intervalle kann nun als Fläche (Grenzfläche) dargestellt werden. Sämtliche Grenzflächen werden zur Verwaltung in einer Oracle-Datenbank hinterlegt.

6.3.1.3 Analyse der Abweichung vom Grenzwert

Zur besseren Bewertung der Steinschlagsimulation wird mithilfe eines zusätzlichen Analyse Kriteriums die Abweichung des Auftreffwinkels vom Grenzwert farblich dargestellt. Durch die Einfärbung der Abweichung vom zulässigen Grenzwert, wird die Auswertung augenblicklich für den Anwender visualisiert. Die Zuordnung des Grenzwertes erfolgt im Rahmen der Diagnoseflächen, welche abhängig von der Grenzfläche für die Karosseriefläche sind. Für jede Diagnosefläche kann hier die passende Grenzfläche angegeben werden. Wie in Abbildung 6.29 erfolgt dann entsprechend die Analyseeinfärbung. In den Pebbles-Optionen kann dann eine eigene Farbabstufung zu diesem Kriterium angegeben werden. Auch für die Gitteranalyse wird dann die Abweichung vom Auftreffwinkel als Grenzwert betrachtet.

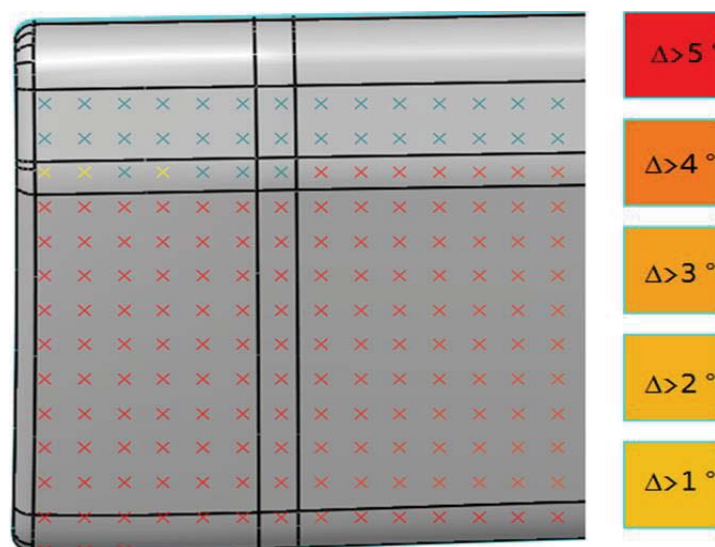


Abbildung 6.29: Farbliche Simulationsdarstellung der Karosserieoberfläche von der Abweichung des Auftreffwinkels vom Grenzwert

6.3.1.4 Darstellung der Abweichung des Auftreffwinkels vom Grenzwert in 3D

Zur besseren Veranschaulichung der Abweichung des Auftreffwinkels vom Grenzwert können die Ergebnisse einer Steinschlagsimulation dreidimensional in CATIA aufbereitet werden. Die Simulationsergebnisse (3D-Kontur der Auftreffpunkte) werden dabei mit der dazugehörigen Grenzkontur in 3D bewertet (Abbildung 6.30). Ist die 3D-Kontur der Auftreffpunkte unterhalb der Grenzkontur, dann ist diese im zulässigen Grenzwertbereich „i.O.“ (in Ordnung). Durchbricht die 3D-Kontur der Auftreffpunkte die Grenzfläche, dann ist diese im unzulässigen Grenzwertbereich „n.i.O.“ (nicht in Ordnung). Abhängig vom angegebenen Material und Oberfläche wird eine Grenzkontur aus den hinterlegten Grenzlinien aus der Bewertung der Steinschlagsimulation aufgebaut. Anstelle einer festgelegten Grenzkontur können auch Simulationen von anderen Fahrzeugprojekten als Grenzkontur herangezogen werden. Die Auftreffpunkte aus der Simulation werden nun zum Abgleich mit der Grenzfläche wie folgt dargestellt:

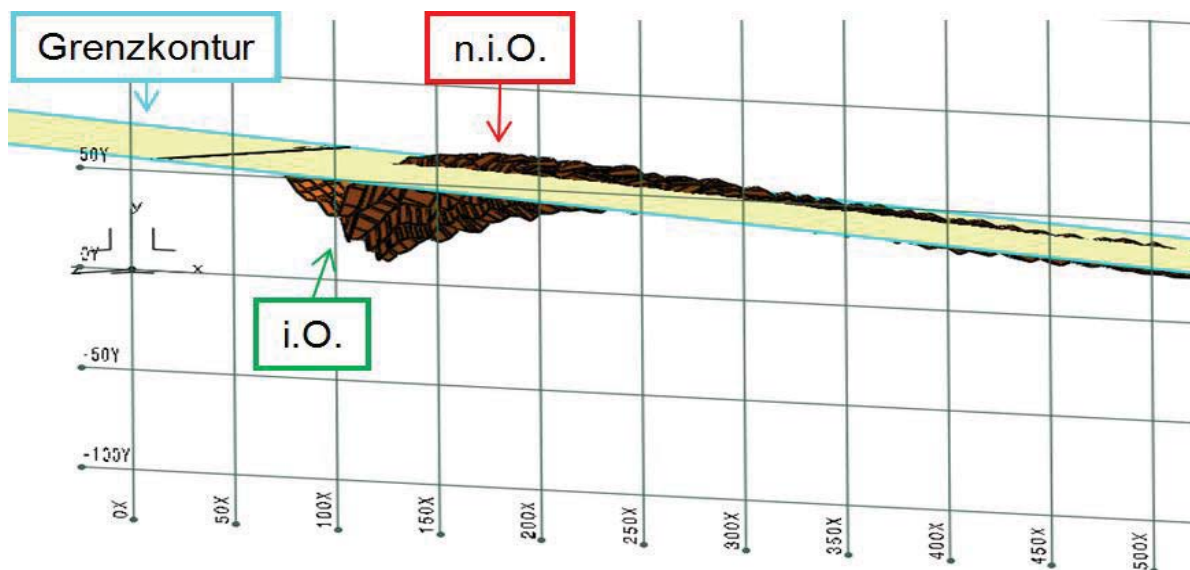


Abbildung 6.30: 3D-Dargestellung der Simulationsergebnisse (3D-Kontur der Auftreffpunkte) und der Grenzkontur (Bewertungsfläche). Auftreffwinkel unterhalb der Grenzkontur i.O. und oberhalb der Grenzkontur n.i.O.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Steinschlagsimulation beschäftigt sich mit dem vom Reifen ausgehenden Eigenbewurf durch Steine an der Karosserie und am Fahrwerk. Gegenwärtig läuft die Steinschlagbewertung rein geometrisch über die Ermittlung der Auftreffwinkel im Simulationstool „Pebbles II“. Die derzeit verfügbaren Methoden zur Simulation erlauben keine Vorhersagen zur Schädigung von Oberflächen durch Steinschlag.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Aussagequalität der Steinschlagsimulation im Hinblick auf die Oberflächenschädigung zu verbessern. Dafür wurden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Anhand von praktischen Versuchen wurden zum einen Abwurfprofile von Steinen mittels Aufnahmen per High-Speed-Kamera an einem Versuchsfahrzeug im Feldversuch ermittelt. Zum anderen wurde mit Hilfe eines Fallturm-Prüfstands die Oberflächenschädigung durch Steinschlag aus den Feldversuchen experimentell unter definierten Bedingungen untersucht, um die wesentlichen Schädigungsparameter ausfindig zu machen. Hier war das Ziel, ein Schädigungsmodell für die Durchschlagskraft von Steinen durch die Lackschicht zu erstellen. In den Fahrversuchen wurden reale Schadensbilder aufgezeichnet, die aber wegen der großen Menge an Einflussgrößen nur schwer reproduzierbar waren. Deshalb wurden in Fallturmversuchen theoretische Schadensbilder erzeugt, die aufgrund des klar definierten Versuchsaufbaus reproduzierbare Ergebnisse aufwiesen. Um eine Brücke zwischen den Fahrversuchen und den Versuchen aus dem Fallturm ziehen zu können, wurden Schadensbilder aus dem Feld analytisch ausgewertet und mit den Schädigungen aus dem Fallturm verglichen. Die Erkenntnisse aus den praktischen Versuchen wurden in das Simulationstool „Pebbles II“ eingearbeitet, mit dem Ziel, bei einer Steinschlagsimulation die resultierende Oberflächenschädigung aus der Erprobung im Feld darzustellen. Die Kernaufgabe bestand darin, die Schnittmenge der beiden Versuchsaufbauten zu finden, so dass diese Schnittmenge einen definierten Bereich darstellt, auf den sich weitere Forschungen und Simulationen konzentrieren können.

Steine, die durch das eigene Fahrzeug aufgeworfen werden und auf die Karosserieaußenhaut treffen, verursachen verschiedene Arten von Schädigungen. Es können großflächige Lackvermattungen, die nicht tiefer als in die Klarlackschicht eindringen, entstehen, als auch im Extremfall einzelne Treffer, die bis auf das

Grundmaterial durchschlagen. Dabei ist der Steinabwurf abhängig von den Einflussparametern wie beispielsweise Fahrzustand oder Bereifung eines Fahrzeugs. Eine steigende Fahrgeschwindigkeit hat keinen direkten Einfluss auf die Steingeschwindigkeit. Hier kommt es zu einer Verschiebung des gefährdeten Bereichs am Fahrzeug, da die Flugbahn des Steins relativ zum Fahrzeug gesehen, abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Anzahl an aufsteigenden Steinen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten zu.

Der Einfluss des Reifenprofils wurde durch die Veränderung des Reifentyps analysiert. Es wurden drei unterschiedliche Reifenarten wie Winter- und Sommerreifen sowie profillose Reifen bei definierten Fahrsituationen (konstante Fahrt mit definierter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung) untersucht. Hierbei zeigen die Ergebnisse der profillosen Reifen, dass die Abhängigkeit des Reifeninnendruckes zur Reifenaufstandsfläche bei den Fahrsituationen konstanter Fahrt, beim beschleunigten Anfahren ab 0 km/h und bei der Beschleunigung des Fahrzeuges ab einer Geschwindigkeit von 40 km/h jeweils miteinander korrelieren. Die Sommerreifen hingegen zeigen im Vergleich zu den profillosen Reifen bei den Fahrsituationen mit Reifenschlupf, wie dem beschleunigten Anfahren ab 0 km/h und bei der Beschleunigung des Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h, ein anderes Bild. Je größer der Reifeninnendruck bzw. kleiner die Reifenaufstandsfläche der Sommerreifen mit Reifenschlupf ist, desto stärker der Steinabwurf. Auch bei den Winterreifen nahm die Häufigkeit der abgeworfenen Steine bei den Fahrsituationen mit Reifenschlupf und steigendem Reifeninnendruck zu. Bei konstanter Fahrt, also Fahrsituationen ohne Reifenschlupf, zeigte der Winterreifen bei abnehmendem Reifeninnendruck bzw. größerer Reifenaufstandsfläche eine Zunahme der Häufigkeit der abgeworfenen Steine. Der Reifeninnendruck erwies sich als eine Einflussgröße in Abhängigkeit der Fahrsituation. Für die Fahrsituation bei konstanter Fahrt konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Reifenaufstandsfläche und der Häufigkeit der abgeworfenen Steine festgestellt werden. Bei den Fahrzuständen „Beschleunigung“ konnte ein kombinierter Einfluss aus Reifenschlupf und dem Reifenprofil der verschiedenen Reifenarten ermittelt werden. Dabei zeigte das Reifenprofil bei erhöhtem Reifenschlupf einen „Schaufel-Effekt“, der mit abnehmender Reifenaufstandsfläche zunahm.

Im Fallturm wurden Schädigungsparameter definiert. Zuerst wurde der Einfluss des Auftreffwinkels mit dem Projektil Stein untersucht. Die Versuchsergebnisse dieser Versuchsreihe ließen sich jedoch nur schlecht reproduzieren, da die unsymmetrische Form der Steine im freien Fall zu Rotationen geführt haben. Aus diesem Grund mussten die Versuche mehrfach wiederholt werden, bis das Projektil die Probenplatte traf. Selbst bei Versuchen, die nur mit ein und demselben Stein durchgeführt wurden, gab es beim Auftreffen auf die Probenplatte immer Unterschiede. Der Stein traf entweder mit einer mehr oder weniger scharfen Kante oder mit einer runden Kante auf. Aus diesem Grund wurden die weiteren Versuchsreihen mit Dodekaeder-förmigen Projektilen durchgeführt. Dabei wurde, die Beziehung zwischen Auftreffwinkel und den Schädigungsparameter wie Aufprallenergie und maximale Eindringtiefe untersucht. Die dabei entstandenen Schädigungen wurden in verschiedene Einschlagsformen unterteilt und die Aufprallmechanismen beschrieben. Mithilfe dieser klassifizierten Einschlagsformen wurde ein Modell aufgebaut, um den Einfluss der Aufprallenergie und des Auftreffwinkels von Steinschlägen zu bestimmen. Die Panzerformel, übernommen aus dem militärischen Bereich zur Abschätzung der Durchschlagskraft von Vollmantelgeschossen, diente dabei als Grundlage für diese Berechnung. Dieses Steinschlagmodell basiert auf den Messdaten der Fallturmversuche und lässt sich auf den Steinschlagmechanismus anwenden. Zur Validierung wurden die Ergebnisse aus den Fallturmversuchen mit Ergebnissen aus einer Splitterprobung (realen Einschläge am Kotflügel und Schweller) eines Erprobungsfahrzeugs ausgewertet und miteinander verglichen. Dadurch wurde nachgewiesen, dass die Einschläge bei den Fallturmversuchen tendenziell dem Schadensbild aus dem Feld entsprechen und dass der Winkeleinfluss beim Steinschlag auf Lackoberflächen im Fallturm nachgestellt werden kann.

Die Schnittmenge aus den Fahr- und Fallturmversuchen lässt sich wie folgt bestimmen. Hierfür wurden die Schadensbilder der splitterproben Fahrzeuge und die zahlreichen Auswertungen der Fallturm-Ergebnisse in einer Weiterentwicklung des Simulationstools zusammengeführt. Schadensbilder und Ergebnisse aus den Fahr- und Fallturmversuchen können nun in dem Simulationstool aufgerufen werden. Zusätzlich wurden Bewertungskriterien in Form einer Grenzwertfunktion für den Auftreffwinkel definiert, mit dessen Hilfe die Steinschlagsimulation Abweichungen vom Grenzwert des Auftreffwinkels farblich für den Anwender visualisiert. Mit Hilfe einer

weiteren Funktion können diese Abweichungen vom Grenzwert auch dreidimensional in CATIA aufbereitet werden. Die Simulationsergebnisse (3D-Kontur der Auftreffpunkte) werden dabei mit der dazugehörigen Grenzkontur in 3D bewertet. Auftreffpunkte unterhalb der Grenzkontur sind „i.O.“ und Auftreffpunkte die Grenzfläche durchbrechen sind „n.i.O.“ Es können auch Simulationsergebnisse von anderen Fahrzeugprojekten als Grenzkontur (Bewertungsfläche) herangezogen werden.

In der Datenbank hinterlegte reale Schädigungsbilder von Erprobungsfahrzeugen nach einer Splitterprobung können ebenfalls dem Anwender angezeigt werden, wie in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Weiterentwicklung der Steinschlagsimulation ermöglicht bereits in der frühen Entwicklungsphase erste Aussagen über die zu erwartende Schädigungen durch Steine auf die Karosserieaußenhaut zu treffen. Diese gewonnenen Erkenntnisse können frühzeitig in die Gestaltung der Seitenkontur einfließen, um die spätere Aufbringung von Schutzfolien einzusparen. Auch die Reduzierung der derzeit noch notwendigen Splitterprobung zur Validierung der Simulationsergebnisse bringen langfristig eine Zeit- und Kostenersparnis mit sich.

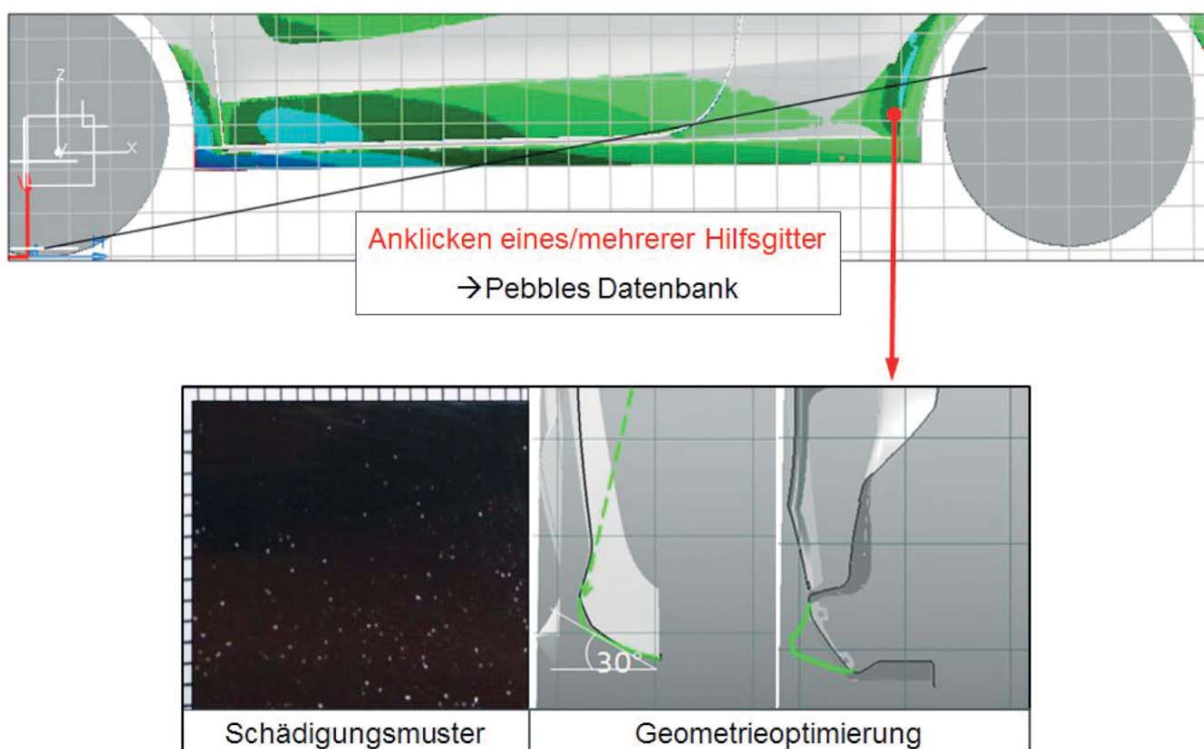


Abbildung 7.1: Weiterentwicklung der Steinschlagsimulation: Darstellung der Schädigungsbilder aus der Pebbles-Datenbank

Weiterführende Arbeiten könnten Fragestellungen wie die Temperaturabhängigkeit, das Verhalten verschiedener Lacksysteme bei unterschiedlichen Substraten (wie Kunststoff, Aluminium, Magnesium usw.) bei Steinschlag behandeln und die dabei entstehenden Schädigungsarten (evtl. temperaturbedingt neue Einschlagsformen) bestimmen.

Beim Thema Steinabwurf könnte weiterführend der Einfluss der Fahrbahn auf das Verhalten von Steinen beim Überfahren, mithilfe von Beschleunigungssensoren (integriert in die Fahrbahn) die Bewegung der Fahrbahn selbst untersucht werden. Die Hypothese ist, dass die Fahrbahn, abhängig von der Fahrbahnbeschaffenheit, beim Überfahren eines Fahrzeuges den Steinen einen Impuls mitgeben und dadurch die Flugbahn der Steine beeinflusst wird. Zusätzlich könnte eine Methodik zur Auswertung der High-Speed-Aufnahmen bei einem fahrzeugfesten Kamerasystem entwickelt werden. Mithilfe einer solchen Auswertemethodik wäre es möglich, die tatsächliche Flugbahn der Steine mit der dritten Dimension darzustellen, um Einflussparameter wie den Lenkwinkel detailliert zu untersuchen.

8 Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] Lampe Th., Laudien G., Große S., Aggressive Streusalze, Volkswagen AG, Konzernlabor, Wolfsburg, 2006, 6
- [2] Krottmaier J., Versuchsplanung, Der Weg zur Qualität 2000; Verlag Industrielle Organisation, Auflage 2, Zürich, 1991, 2
- [3] Berger A.: Kalibrierung Pebbles II V5: Bestimmung der vom Reifen ausgehenden Abwurfhäufigkeit von Steinschlag auf der Grundlage eines realen Schädigungsbildes, T-Systems, Wolfsburg, 2007
- [4] Berger A.; Neumann U., Handbuch zum Programm Pebbles II unter CATIA V5; Release 1.5.0. T-Systems, Wolfsburg, 2008
- [5] Rösler M.A., Klinke E., Kunz G., The effect of temperature development during stone impact on damage morphology and adhesion of organic coatings, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 10, 1996, 1021- 1029
- [6] Ramamurthy A.C., Zehnder A.T., Bless S.J., Brar, N.S., Stone impact damage to automotive paint finishes: Measurement of temperature rise due to impact, Int. J. Impact Engng., Vol. 13, No.1, 1993, 133-143
- [7] Lonyuk M., Bosma M., Riemsdag A. C., Zuidema J., Bakker A., Janssen M., Stone-impact damage of automotive coatings: A laboratory single-impact tester, Progress in Organic Coatings, Vol. 58, Issue 2-3, 2007, 241-247
- [8] Ramamurthy A. C., Lorenzen W. I., Bless S. J., Stone impact damage to automotive paint finishes: An introduction to impact physics and impact induced corrosion, Progress in Organic Coatings, Vol. 25, Issue 1, 1994, 43-71
- [9] Papini M., Spelt J. K., Organic Coatings removal by particle impact, wear, Vol. 213, Issue 1-2, 1997, 185-199
- [10] Schönberger A., Prognose des Steinschlags und der induzierten Korrosion am Fahrzeug, TU Erlangen-Nürnberg, Dissertation, Erlangen, 2012
- [11] DIN 70 000, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1994
- [12] Schorn M., Fahrdynamik-Regelung - Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik, Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- [13] Jäck R., Erarbeitung von Möglichkeiten zur Bestimmung und Messung von Steinschlagschäden an Karosserie und Fahrwerk, FH Ravensburg-Weingarten, Diplomarbeit, AUDI AG, Ingolstadt, 2005

- [14] BASF coatings GmbH, „basf-coating.com,“ [Online]. Available: http://www.basf-coatings.com/global/ecweb/de/content/products_industries/automotive-oem-coatings/index. [Zugriff am 10.08.2015].
- [15] AUDI AG, Konstruktionsrichtlinie Steinschlag, Abteilung I/EKK, Ingolstadt, 1994
- [16] Adamski D., Simulation in der Fahrwerktechnik, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- [17] Leister G., Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0671-0
- [18] Haken K. L., Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik, Carl Hanser Verlag., München, 2013, ISBN 978-3-446-22812
- [19] Finke N., Identifizierung von Reifenparametern für ein Rennsportfahrzeug, Hochschule Ingolstadt, Bachelorarbeit, Ingolstadt, 2011
- [20] Trzesniowski M., Rennwagentechnik - Grundlagen und Konstruktion, Konstruktion Systeme, Vieweg Teubner, Springer Verlag, Fachmedien, Wiesbaden, 2012
- [21] Ratz I., Analytische und versuchstechnische Entwicklung der Einflussparameter auf die Steinschlagsimulation an der Fahrzeughinterachse, Fachhochschule Braunschweig / Wolfenbüttel, Diplomarbeit, Volkswagen AG, Wolfsburg, 2009
- [22] Hering E., Martin R., Stohrer M., Physik für Ingenieure, Springer Verlag, Auflage 11, Berlin, Heidelberg 2012
- [23] Grote K.H., Feldhusen J., Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau; Springer Verlag, Auflage 23; Berlin Heidelberg 2011
- [24] Papula L., Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Vieweg Verlag, Auflage 9, Wiesbaden, 2006
- [25] Schmalzried J., Untersuchung des Einflusses der Schichtstärke von Lackschichten auf Haftung und Steinschlagbeständigkeit, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, Stuttgart 1991
- [26] Goodyear Dunlop Tires Germany GmbH: Reifenaufbau; Verfügbar unter: http://www.goodyear.eu/gd_de/innovation/produktion/reifenaufbau/ [Zugriff am 05.05.2015]
- [27] Heißing B., Erso M., Fahrwerkhandbuch, Vieweg- und Teubner- Verlag, Auflage 3, Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-8348-0821-9

- [28] Zomoter A., Fahrwerktechnik, Fahrverhalten, Vogel Buchverlag, 1. Auflage, Würzburg, 1987
- [29] Schnattinger H., Brettmann M. EP 83 935.60, Konzern interne Quelle, Volkswagen 2011
- [30] Kurtulus J., Entwicklung von Abwurfprofilen als Eingangsgröße für die Steinschlagsimulation „Pebbles II“ für Karosserie- und Fahrwerksbauteile, Hochschule Amberg-Weiden; Diplomarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2009
- [31] „Website der Stadt Trier,“ [Online]. Available: <http://www.trier.de/Leben-in-Trier/Sicherheit/Winterdienst/>. [Zugriff am 06.06.2015]
- [32] „Verband der Kali- und Salzindustrie e. V.,“ 2010. [Online]. Available: http://www.vks-kalisalz.de/uploads/tx_powermail/files/Winterdienst_2010.pdf. [Zugriff am 06 05 2014]
- [33] Rossié S., Untersuchung der Steinschlagresistenz von Automobillackierungen mit dem Einzelschlagprüfverfahren, Ingolstadt, Audi AG, 1988
- [34] IPW-Bericht, Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung des Abschleuderverhaltens von Rollsplitt durch Reifen, Dezember 1996
- [35] Goldschmidt A., Streitberger H.-J., BASF-Handbuch Lackiertechnik, Vincentz Verlag, Hannover, 2002, 716
- [36] Volkswagen Selbststudienprogramm 214; Interne Quelle, Wolfsburg: Volkswagen AG, 1999
- [37] Zorll U., Untergrundeinflüsse auf das Verhalten von Korrosionsschutzbeschichtungen bei stoßartiger Belastung, Werkstoff und Korrosion, Bd. 34, Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1983, 514-519
- [38] Sadowski F., Basiswissen Autoreparaturlackierung, Vogel Verlag, Auflage 1, Würzburg: 2000
- [39] Breinsberger J., Koppelman J., Verhalten von Dreischichtlackierungen im Steinschlagtest, Farbe und Lack 88, 1982, 916-920
- [40] Hibbeler R. C., Technische Mechanik 3. Dynamik, Pearson Education, München, 2012
- [41] Symietz D., Steinschlag- und Korrosionsschutz, Unterbodenschutz und Hohlraumkonservierung bei Kraftfahrzeugen, Landsberg/Lech, Verl. Moderne Industrie, 1989
- [42] Krupp, Rheinmetall, Waffentechnisches Handbuch, 1985, 511-513

- [43] Sydow K., Schäden an Autolacken Leitfaden zur Beurteilung und Beseitigung, Vincentz-Verlag, Hannover, 1995
- [44] Weiß K., Analytische Entwicklung von Steinschlagsimulation und versuchstechnischer Entwicklung einer Steinschlagmesseinrichtung mit anschließendem Abgleich beider Verfahren, Westsächsischen Hochschule Zwickau, Diplomarbeit, Volkswagen AG, Wolfsburg, 2009
- [45] Berger A., Schweer U., Handbuch zum Programm Pebbles II unter CATIA V5 Release 1.6.0, T-Systems, 2010
- [46] Nüscheler R., Die Durchschlagleistung von Panzerabwehrgeschützen, ASMZ Allgemeine schweizerische Militärzeitschrift, Band 118, Heft 10, 1953, 733-737
- [47] AOS Technologies AG: Produktbroschüre S-VIT; Verfügbar unter: http://www.aostechnologies.com/fileadmin/user_upload/PDFs/Highspeed/S-VIT_LS_ProductLeaflet_en.pdf; Ingolstadt (Stand: 23.04.2014 Audi AG:
- [48] Audi Q5 Katalog; Verfügbar unter: <http://www.audi.de/content/dam/nemo/models/misc/pdf/my-2013/katalog/2013-Q5-Katalog.pdf>; Ingolstadt (Stand:18.09.2013)
- [49] DIN EN ISO 20567-1: Beschichtungsstoffe –Prüfung der Steinschlagfestigkeit von Beschichtungen –Teil 1: Multischlagprüfung (ISO 20567-1:2005); Deutsche Fassung EN ISO 20567-1: 2006
- [50] Optische Propfilometer FRIES RESEARCH & TECHNOLOGY GMBH Bedienungsanleitung der MicroProf Handbuch, 2004
- [51] DIN EN 933-1 unter Berücksichtigung der DIN EN 13043
- [52] DIN EN ISO 21227-1, Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden mittels digitaler Bildverarbeitung – Teil 1, Allgemeine Anleitung, 2003
- [53] Leica Microsystems CMS GmbH, Leica DCM 3D Version 3.2 Manual, Leica Microsystems, Wetzlar, 2011 Erichsen, Betriebsanleitung
- [54] Schichtdickenmessgerät TNO PAINT BORER Modell 518 MC, Erichsen, Hemer, 2012
- [55] Gross D., Hauger W., Schröder J., Wall W.-A., Technische Mechanik 3 Kinetik; Springer Verlag; Auflage 12; Berlin, Heidelberg, 2012
- [56] Antesberger T., Splitterprobung PG Ehra; Bricht, Ingolstadt, 2011
- [57] Niggemann, M., Angewandter Straßenbau – Straßenfertiger im Einsatz, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012

- [58] Quack D., Möller M., Ökobilanz des Winterdienstes in den Städten München und Nürnberg, Öko-Institut e.V. Freiburg; Freiburg, 2004
- [59] Rommel G., Brück F., Diedrichs R.; Kempis R.-D., Kaas H.-W., Fuhry G.; Kurfess V., Qualität gewinnt; McKinsey & Company Inc., Schäffler-Poeschl Verlag, Stuttgart, 1995
- [60] Willinger B., Optimierung des Prüfkriteriums zur Bewertung der Qualität von Lacken in der Automobilindustrie, Universität Erlangen-Nürnberg; Diplomarbeit, Erlangen, 2009
- [61] Rahlves M., Seewig J., Optisches Messen technischer Oberflächen, Beuth Verlag GmbH, Berlin ,2009
- [62] Bode O., Haeger D., Vorstellung eines Prüfverfahrens zur Bewertung des Abschleuderns von Rollsplitt durch Reifen; VDI, Nr. 1224, 1995, 129-151
- [63] V.D.Kerhoff P., Haagen H., Lackschadenkatalog, Vogel Buchverlag, Auflage1, Würzburg 1995
- [64] Thurn und Taxis A., Steinschlag Versuch mit Kollektor; Praktikumsarbeit, 2006
- [65] Studienarbeit, SVM-Untersuchung zur Vermeidung von Steinschlagschäden in frühen Phasen des Automobilentwicklungsprozesses, RWTH Aachen, Masterarbeit, Dr. Ing. h.c. F. Porsche, Weissach
- [66] Temmler F., Möglichkeiten zur Quantifizierung einer Steinschlagbeanspruchung, FHTW Berlin, Diplomarbeit, Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG, Weissach, 2005
- [67] Feichtmaier G., Radhaus- und Karosseriebeaufschlagung durch vom Rad abgeschleuderte Masseteilchen, Diplomarbeit, 1982, 629
- [68] Ramamurthy A. C., Isbell W. M., Venditto V. A., Jennings T., Stone Impact damage to automotive paint finishes: A precision instrumented impact device for laboratory simulations; SAE technical paper series, 932331; BIS: VW00020480
- [69] Strobel H., Betrachtungen zum Thema Steinschlag: Mechanismen beim Abwurf von Steinen vom vorausfahrenden Fahrzeug; Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 34.1996, 9; VW00170053
- [70] Kluger- Eigl W., Entwicklung eines Bewertungshintergrundes für das Griffigkeitsmesssystem GripTester in Österreich, TU Wien, Dissertation, Wien, 2009

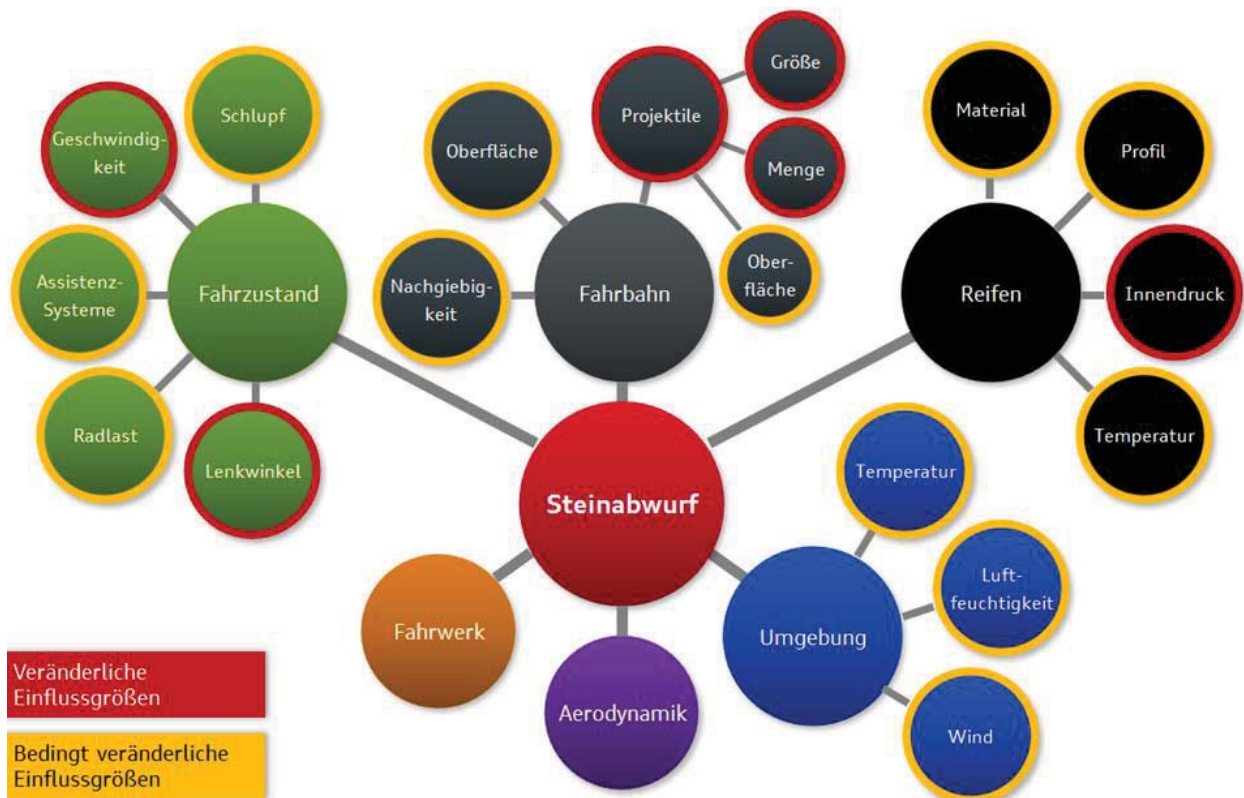
- [71] Raab J, Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Reifenparameter auf den Fahrwiderstand; Hochschule Amberg-Weiden, Diplomarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2009
- [72] Pabst H., Ergebnisse mit Messanhänger, Protokoll, Audi AG, 1994
- [73] Pabst H., Empfehlung zur Steinschlagbegrenzung, Protokoll, Audi AG, 1994
- [74] Zorll U.: Steinschlagauswirkungen auf organische Beschichtungssysteme; Sonderdruck des Forschungsinstitutes für Pigmente und Lacke e.V.
- [75] Kittel H., Anwendung von Lacken und sonstigen Beschichtungen, Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Auflage 2, Hirzel Verlag, Stuttgart, 2008
- [76] Graw, Untersuchungsbericht Nr. 52-11-0109-01, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München, München 2011
- [77] Böge A., Technische Mechanik, Bd. 30, Vieweg, Springer Verlag, Wiesbaden, 2013, 158-160
- [78] Kleppmann W., Taschenbuch Versuchsplanung, Cal Hanser Verlag, Auflage 6, München, 2009
- [79] Hörlin T., Seufert M., Tribologische Modellsysteme für den Verschleiß am Fahrzeugschweller durch Steinschlag. TE-Versuchsbericht-Nr.05/20. Ingolstadt, 2005
- [80] Zwerenz K., Statistik verstehen mit Excel, Oldenburg Wissenschaftsverlag, Auflage 2, München 2008
- [81] Klass.-Nr.57650, PV3.14.4: Farben und Lacke, Mobile Prüfung der Steinschlagfestigkeit von Karosseriedecklackierung; Volkswagen AG, 2003
- [82] Ladstädter E., Grundlagen der Steinschlagsimulation Splitt; Farbe + Lack, 1984, 8, 90, 646-653
- [83] Buchmayr B., Hatzenbichler T., Kessler F., Vergleichende Untersuchungen zum Eindring- und Durchziehverhalten von Feinblechen, BHM, 153. Jg. (2008), Heft 11
- [84] Infrarotkamera thermoIMAGER TIM 160 Bedienungsanleitung Miro-Epsilon

Mitbetreute Abschlussarbeiten:

- [8.1] Schneider M., Entwicklung einer Prüfvorrichtung am Fahrzeug zur Analyse von Oberflächenbeschädigungen durch Steinschlag, Technische Hochschule Ingolstadt, Bachelorarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2013
- [8.2] Brandl J., Analyse der Einflussgrößen bezüglich Abwurf für den Einsatz in der Steinschlagsimulation, Technische Hochschule Ingolstadt, Audi AG, Bachelorarbeit, Ingolstadt, 2013
- [8.3] Taubert T., Analyse der Einflussgrößen beim Steinabwurf im Fahrbetrieb, Hochschule Mannheim, Masterarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2013
- [8.4] Assekour N., Analyse der Einflussgrößen beim Steinabwurf im Fahrbetrieb, Hochschule Karlsruhe, Masterarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2013
- [8.5] Huang Y., Charakterisierung der Oberflächenschädigung durch Steinschlag, Hochschule München; Bachelorarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2014
- [8.6] Kuhn E., Analyse der Einflussgrößen beim Steinabwurf im Fahrbetrieb, Hochschule Schweinfurt, Diplomarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2014
- [8.7] Schneider M., Charakterisierung der Oberflächenschädigung durch Steinschlag, Technische Hochschule Ingolstadt; Masterarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2014
- [8.8] Brandl J., Analyse der Einflussgrößen des Steinabwurfs im Fahrbetrieb, Technische Hochschule Ingolstadt, Masterarbeit, Audi AG, Ingolstadt, 2014

9 Anhang

9.1 Einflussgrößen auf den Steinabwurf



9.2 Versuchsfahrzeug Audi Q5

Versuchsfahrzeug Q5 beklebt mit Kontrastfolie in orange matt, einen Maßstab zur Orientierung und einem Sichtschutz unterhalb des Schwellers. Seitenansicht und Heckansicht des Sichtschutzes (farblich hervorgehoben).



← Fahrtrichtung

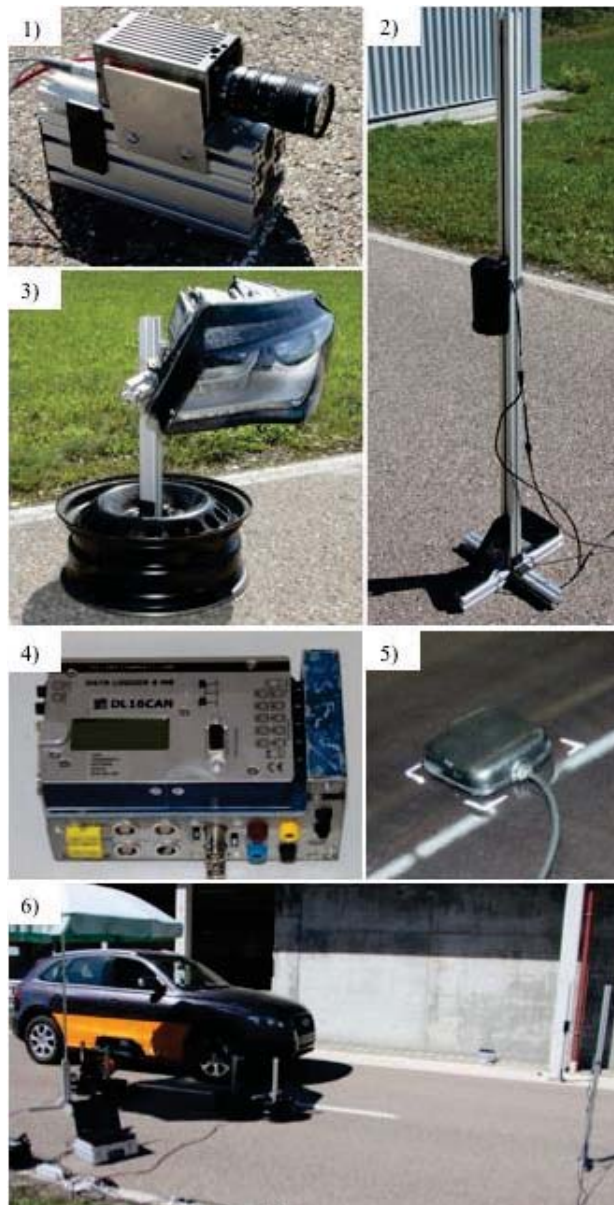
9.3 Teststecke des Versuchsaufbaus

Satelliten Bild der Teststecke des Audi Prüfgelände in Neustadt (Google earth)



9.4 Darstellung des Versuchsequipments

1) High-Speed-Kamera, 2) Lichtschranke, 3) Scheinwerfer jeweils mit einer entsprechenden Halterung, 4) Datenlogger, 5) GPS-Empfänger auf dem Fahrzeugdach, 6) Versuchsaufbau auf der Korrosionsstrecke im PG-Neustadt



9.5 Erprobungsanweisung "Splitterprobung" im Prüfgelände in Ehra [56]

Laufstreckenziel: 667 Durchfahrten, entsprechen 200 km

Streckenlänge: 300 m

Fahreranweisung: „Die Strecke wird mit 40-60 km/h befahren. Dabei wird immer wieder auf ca. 60 km/h beschleunigt und anschließend auf ca. 40 km/h mit mittlerer Bremsleistung runtergebremst.

Die Einfahrtgeschwindigkeit in den Splitt beträgt 25-30 km/h. Zusätzlich dazu sind während des Beschleunigens und Abbremsens leichte Wedelbewegungen (Schlangenlinien) auszuführen. Wedelbewegungen nicht ruckartig und nicht bis zum ESP-Regelbereich provozieren, sondern langsame Lenkradbewegungen im Winkel von ca. 15-25° nach links und rechts. Die Anzahl der Wedelbewegungen sollte pro Durchfahrt ca. 20 betragen.

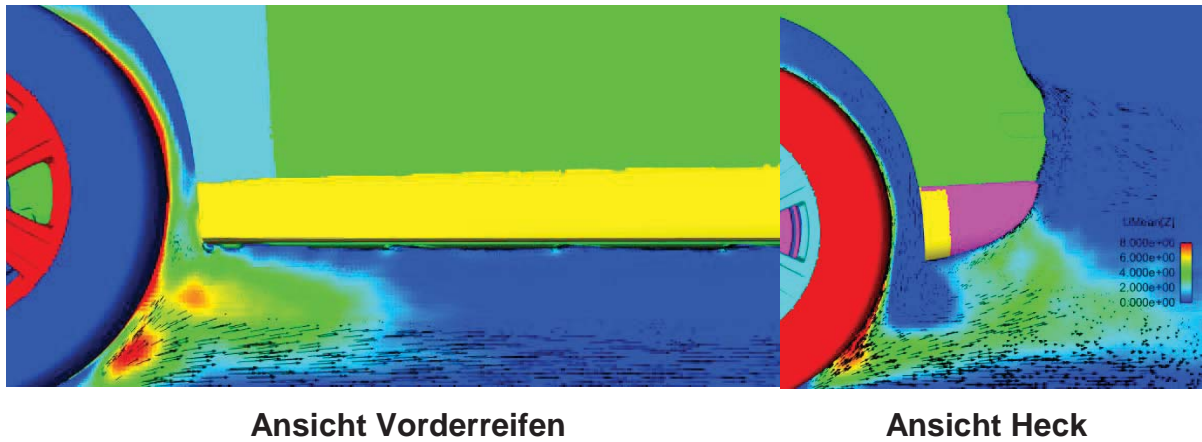
Beim Beschleunigen sollen die Räder nicht durchdrehen; beim Bremsvorgang ist darauf zu achten, dass die Räder nicht blockieren. Bei Schaltgetrieben sollte im 2.-3. Gang und bei Automatikgetrieben in Schaltstufe D/S (je nach Motorleistung) gefahren werden. Die Fahrerassistenzsysteme (ABS/ESP) bleiben aktiv.“ [56]

9.6 Technische Daten: Audi Q5 2,0 TDI quattro [48]

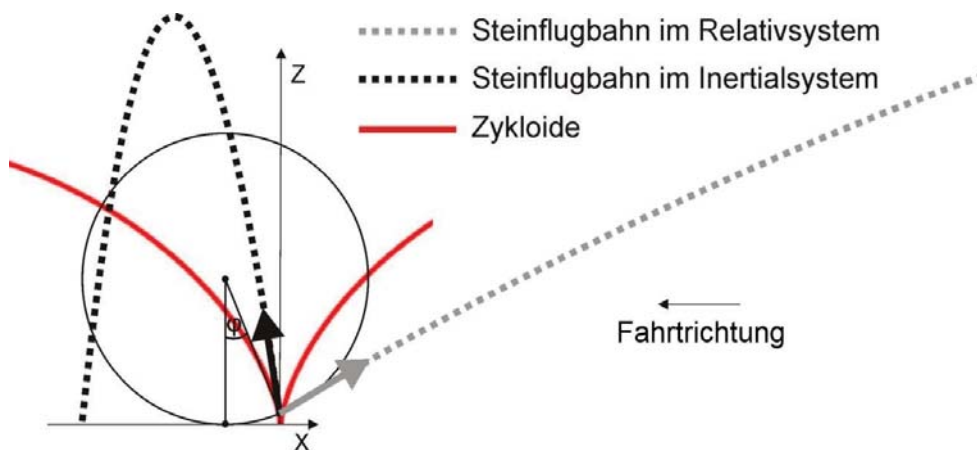
Motorbauart	Reihen-4-Zylinder mit Common Rail Einspritzsystem und Abgasturboaufladung
Hubraum in cm ³	1968
Max. Leistung in kW (PS) bei min ⁻¹	105 (143) / 4200
Max. Drehmoment in Nm bei min ⁻¹	320 / 1750-2500
Antriebsart	Permanenter Allradantrieb
Grundverteilung (Vorder- /Hinterachse)	40:60
Kupplung	Hydraulisch betätigte Trockenkupplung
Getriebeart	6-Gang Handschaltung
Leergewicht ¹ in kg	1892
¹ vollgetankt und mit Versuchsfahrer gemessen	

9.7 Simulationsbild aerodynamischer Einfluss

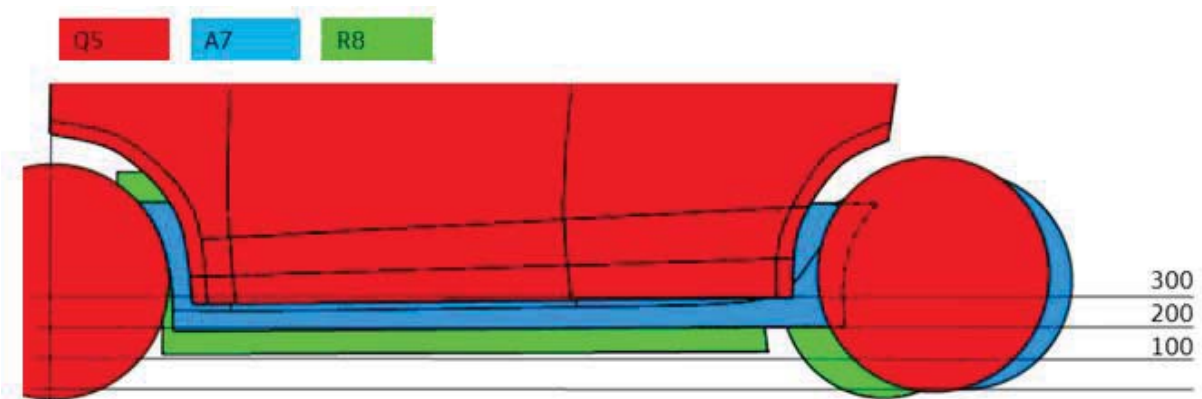
Simulation aerodynamischer Einfluss der Position des Sichtschutzes am Fahrzeugunterboden des Q5. Quelle: Abteilung für Aerodynamik der Audi AG.



9.8 Vergleich von Steinflugbahnen im Relativ- und Inertialsystem [10]

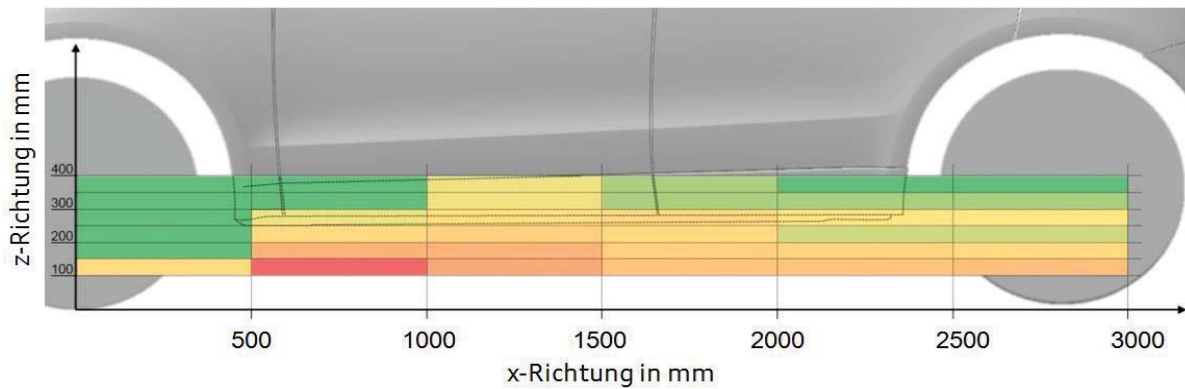


9.9 Fahrzeugmodelle in Höhen Vergleich A-, Q-, R-Reihe [8.3]



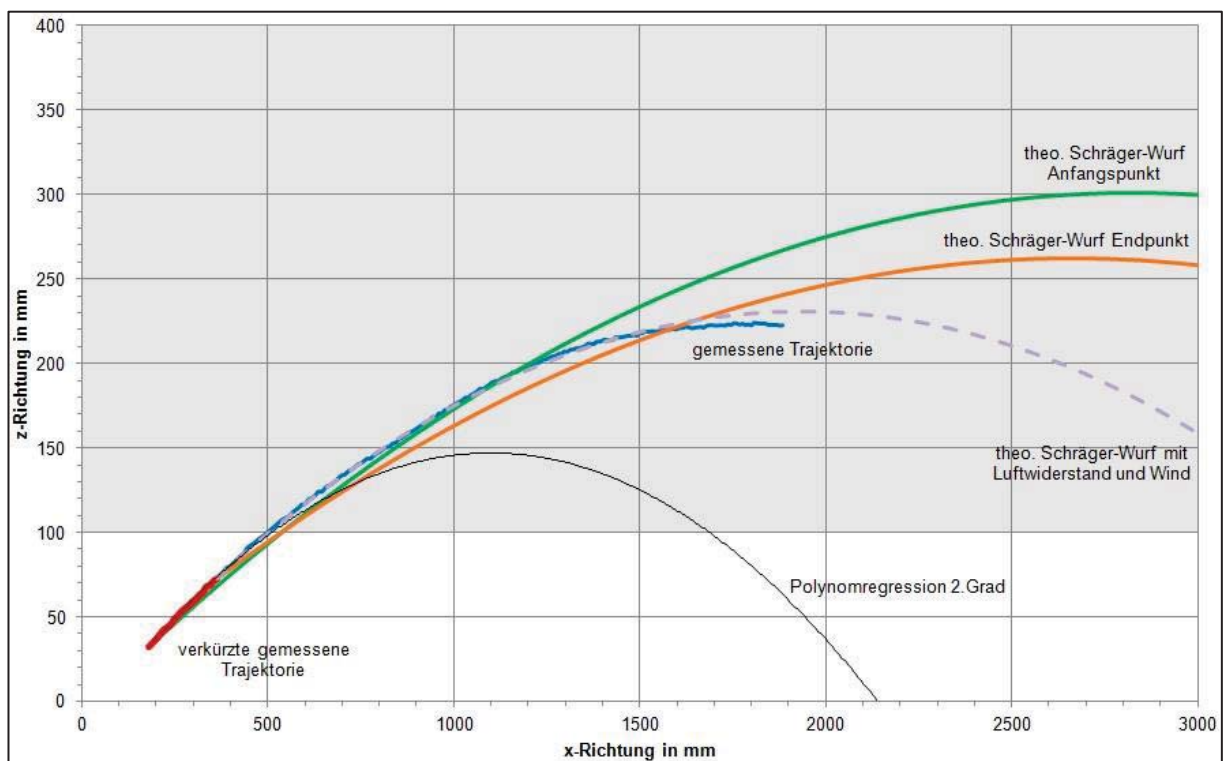
9.10 Rasterung des Abwurfprofils

Beispiel zur Rasterung des Abwurfprofils mit hinterlegtem Fahrzeug (Q5) [8.3]



9.11 Vergleich der theoretischen und gemessenen Trajektorien.

Zur Einschätzung über den gefährdeten Bereich am Fahrzeug wird das Abwurfprofil mit dem CAD-Modell des Versuchsfahrzeugs maßstäblich hinterlegt [8.3]



9.12 Fahrzeug-Vermessungs-Protokoll

Kunde:			Datum: 18.10.2012 10:03			
Firma:			VIN:			
Kennzeichen:			Techniker:			
Kilometerstand:			Auftrags-Nr.:			
FAHRZEUG-VERMESSUNGS-PROTOKOLL						
AUDI, 2012, Q5 [8R] (1BA) Quattro Standardfahrwerk [mit ADS und ADR/ACC und LDW/LA]						
Primäre Winkel			Vorher	Fahrzeugdaten		Nachher
				Min.	Max.	
Vorne	Nachlauf	Links	4°10'	----	----	4°09'
		Rechts	4°05'	----	----	4°04'
	Sturz	Links	-0°35'	-0°48'	-0°02'	-0°35'
		Rechts	-0°29'	-0°48'	-0°02'	-0°29'
	Spur	Links	0°06'	0°07'	0°13'	0°06'
		Rechts	-0°04'	0°07'	0°13'	-0°04'
Gesamt		0°02'	0°13'	0°27'	0°02'	
Hinten	Sturz	Links	-1°34'	-1°45'	-0°55'	-1°34'
		Rechts	-1°43'	-1°45'	-0°55'	-1°43'
	Spur	Links	0°07'	0°05'	0°15'	0°07'
		Rechts	0°07'	0°05'	0°15'	0°07'
		Gesamt	0°13'	0°10'	0°30'	0°13'
	Max. Fahrachswinkel			0°00'	0°10'	
Sekundäre Winkel			Vorher	Fahrzeugdaten		Nachher
				Min.	Max.	
Spreizung	Links	3°58'	----	----	3°58'	
	Rechts	4°02'	----	----	4°02'	
Eingeschlossener Winkel	Links	3°23'	----	----	3°23'	
	Rechts	3°33'	----	----	3°33'	
Spurdifferenzwinkel	Links	2°02'	1°19'	2°19'	2°02'	
	Rechts	2°03'	1°19'	2°19'	2°03'	
Max. Lenkeinschlag innen	Links	39°20'	37°54'	41°24'	39°20'	
	Rechts	40°13'	37°54'	41°24'	40°13'	
Vorspurkurven-Änderung	Links	----	----	----	----	
	Rechts	----	----	----	----	
Radversatz	Vorne	2mm	----	----	2mm	
	Hinten	1mm	----	----	1mm	
Spurweitendifferenz			45mm			45mm
Radstandsendifferenz			0mm			0mm
Fahrzeugniveau vorne	Links	----	----	----	----	
	Rechts	----	----	----	----	
Fahrzeugniveau hinten	Links	----	----	----	----	
	Rechts	----	----	----	----	
Fahrzeuglängsneigung			----			----

Softwareversion: 4.6.9.2

Datenbankversion:

VAG - 122011

Seriennummer/Modell:

Datum der letzten Wartung:


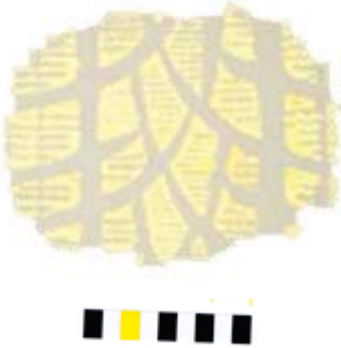

18.10.2012

9.13 Aufnahmen der drucksensiblen Folie

Aufnahmen der drucksensiblen Folie zur Bestimmung der Reifenaufstandsfläche (Latschfläche). Der gelbmarkierte Bereich stellt die analysierte Fläche dar. [8.3]

Sommerreifen		
Reifeninnendruck in bar		
1,5	2,1	3,5
Reifenaufstandsfläche in mm ²		
14369	11704	8377

profillose Reifen		
Reifeninnendruck in bar		
1,5	2,1	3,5
Reifenaufstandsfläche in mm ²		
26797	21809	15083

Winterreifen		
Reifeninnendruck in bar		
1,5	2,3	3,5
		
Reifenaufstandsfläche in mm ²		
9699	9088	8423

9.14 Technische Spezifikation der Hochgeschwindigkeitskamera [47]

AOS Technologies AG, S-VIT	
Sensor (Typ, Bildauflösung)	CMOS APS Sensor, 800 x 600 Pixel 1280 x 1024 Pixel (mit Option 2)
Sensorgöße	800 x 600 Pixel: 11,2 x 8,4 mm Volle Auflösung: 17,92 x 14,33 mm 14 µm Pixelgröße
Lichtempfindlichkeit	ISO 3200 (monochrome), ISO 1600 (color)
Bildrate bei voller Auflösung	1250 fps @ 800 x 600 Pixel, resp. 500 fps @ 1280 x 1024 Pixel (Option 2)
Maximale Bildrate	1250 fps, resp. 16500 fps (bei reduzierter Auflösung)
Bildspeicherkapazität	1,3 GB (Standard); 2,6; 5,2; 10,4 (Optional)
Integrierter Akku, Kapazität	NiMH, 30 Minuten
Datenschnittstelle	Gigabit Ethernet (1000 Mb/s)
Stoßfestigkeit	100G für 15 ms, 3 Achsen
Größe, Gewicht	71 x 71 x 122 mm, 900 g

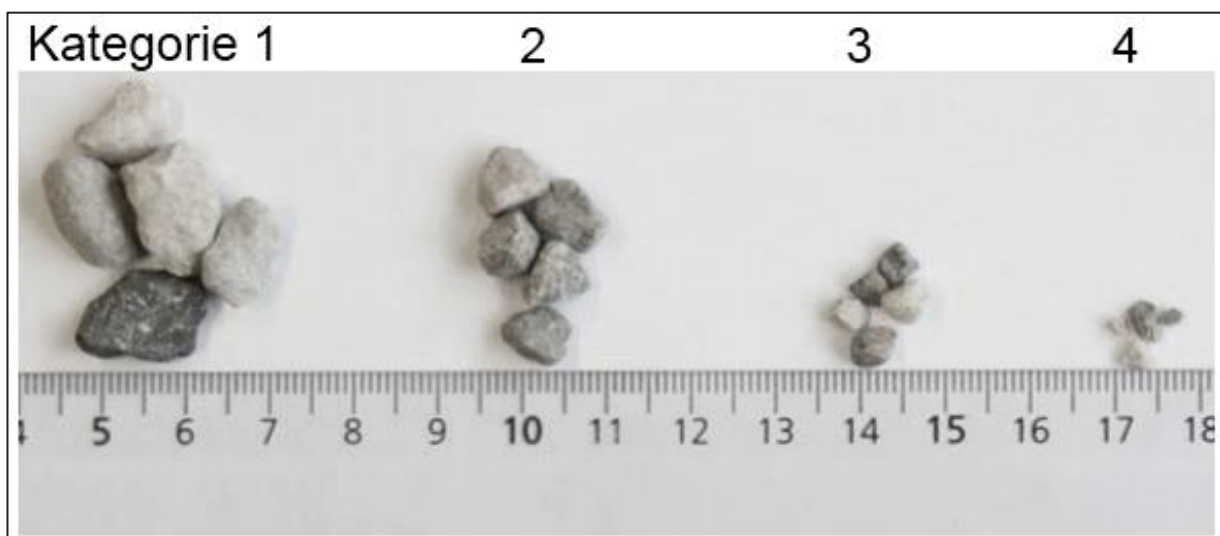
9.15 Zusammensetzung des verwendeten Kiessplitts

Kornzusammensetzung geprüft nach DIN EN 933-1 unter Berücksichtigung der DIN EN 13043 [51]

Korngruppe	Prüfsieb mm	Rückstand M.-%	Durchgang M.-%	Anforderung
2/5 mm	11,2			100
	8	0,0	100,0	98 – 100
	5,6	2,1	97,9	90 – 99
	5	3,9	94,0	90 – 100
	2	80,1	13,9	0 – 10
	1	12,5	1,4	0 – 5
	0,063	1,0	0,4	max. 2
	< 0,063	0,4		

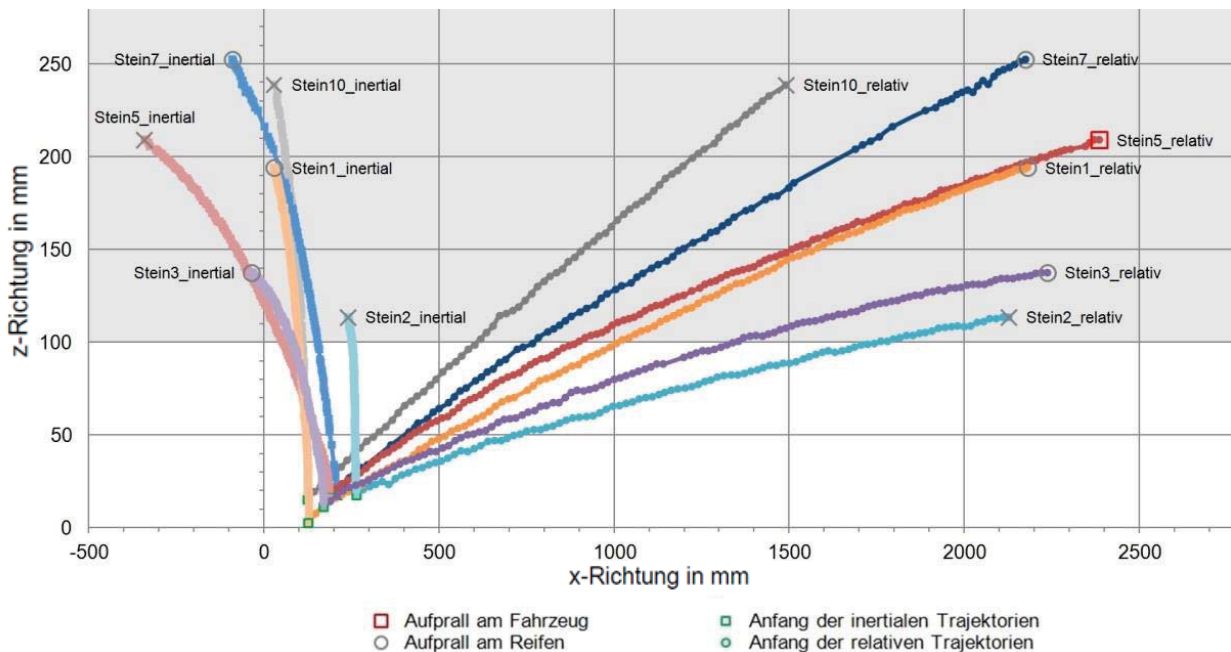
9.16 Steinkategorien

Die Steinmasse ist für die Berechnung der kinetischen Energie eines Steines von Bedeutung. Aus diesem Grund wurden die Steine des verwendeten Kiessplitts nach Größe und Gewicht kategorisiert.

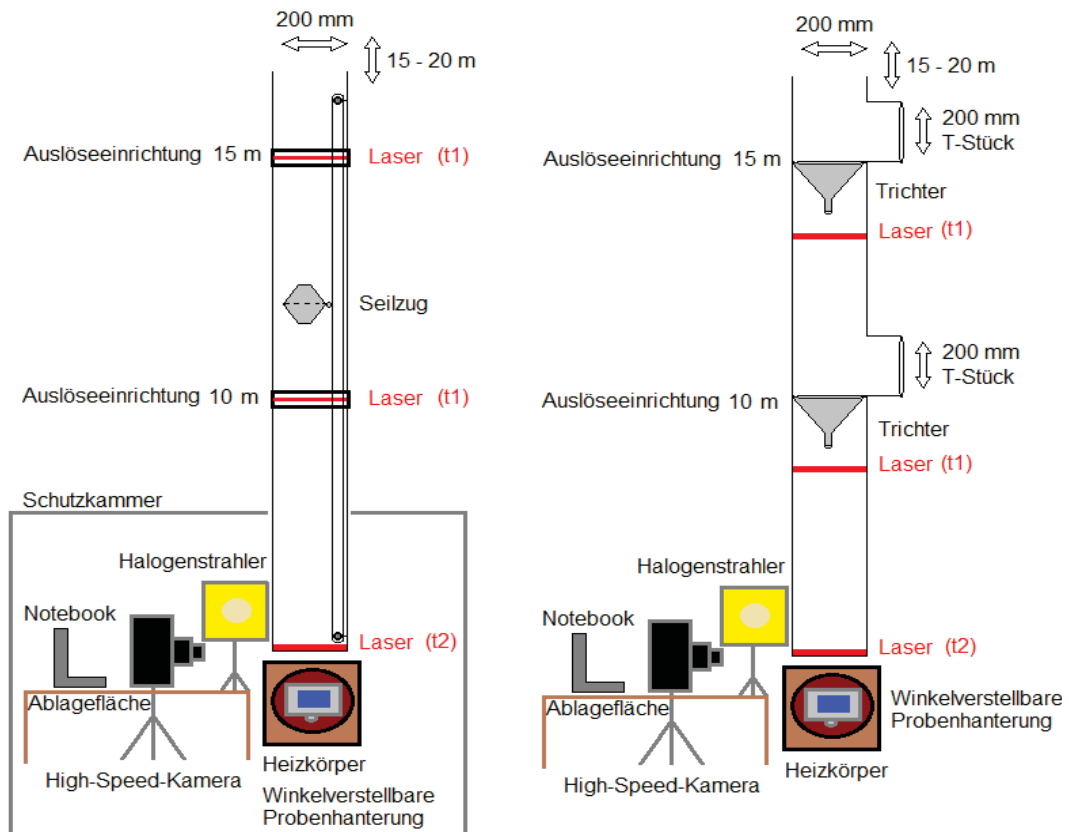


9.17 Beispiel des Versuchs 037 Flugbahn der Steine bei 80 km/h,

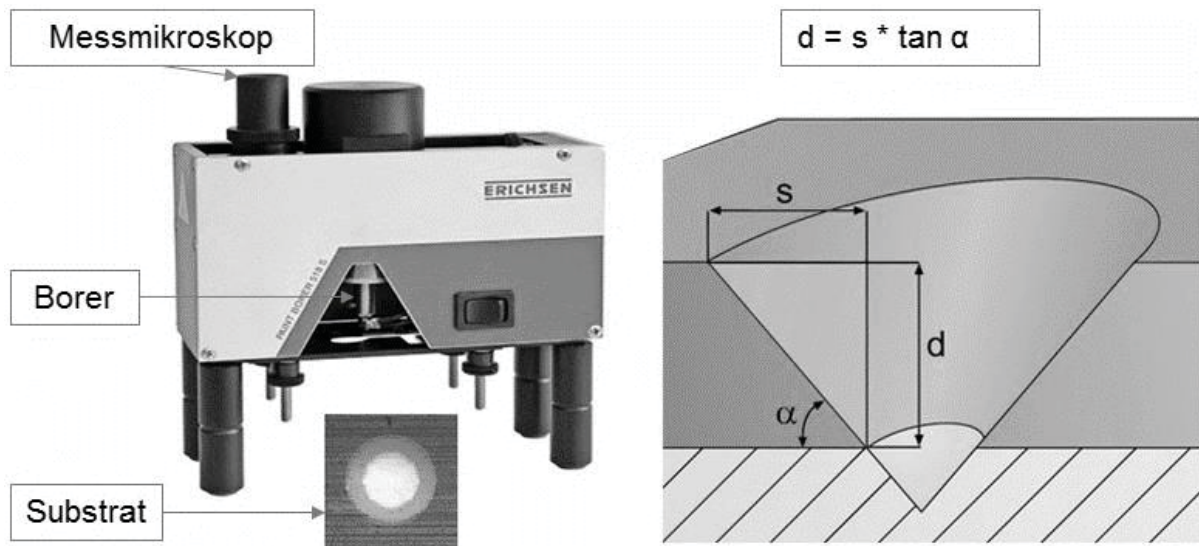
Ortsfestes Bezugssystem (inertial) und fahrzeugfestes Bezugssystem (relativ) in Bezug auf die Flugbahn der Steine bei 80 km/h, bei einem Reifeninnendruck von 21,1 bar. Zur Übersichtlichkeit ist nur ein Teil der Flugbahnen abgebildet. [8.3]



9.18 Skizzen der ersten Entwicklungsstufe des Fallturms



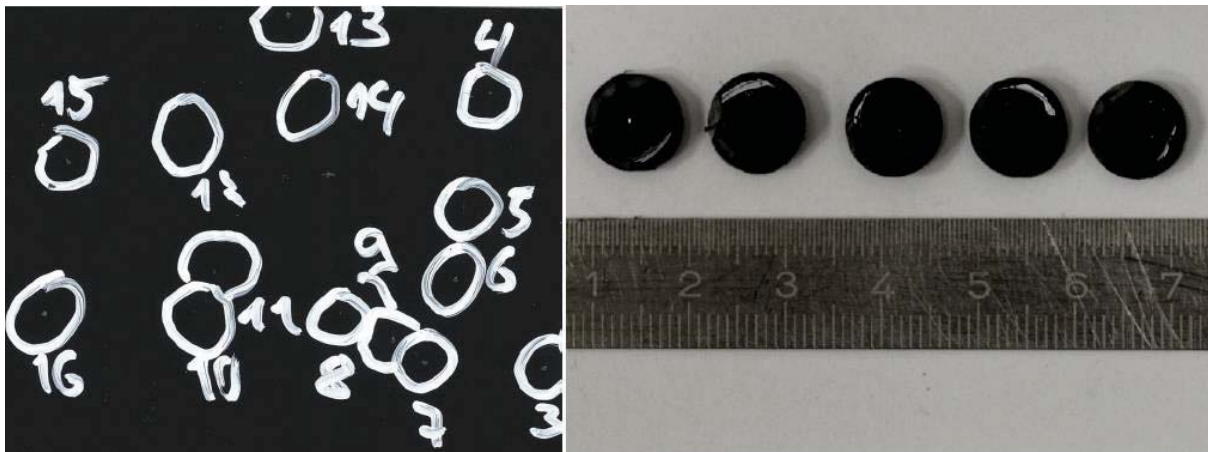
9.19 Point-Borer Messgerät [54]



Messprinzip des Schichtdickenmessgeräts

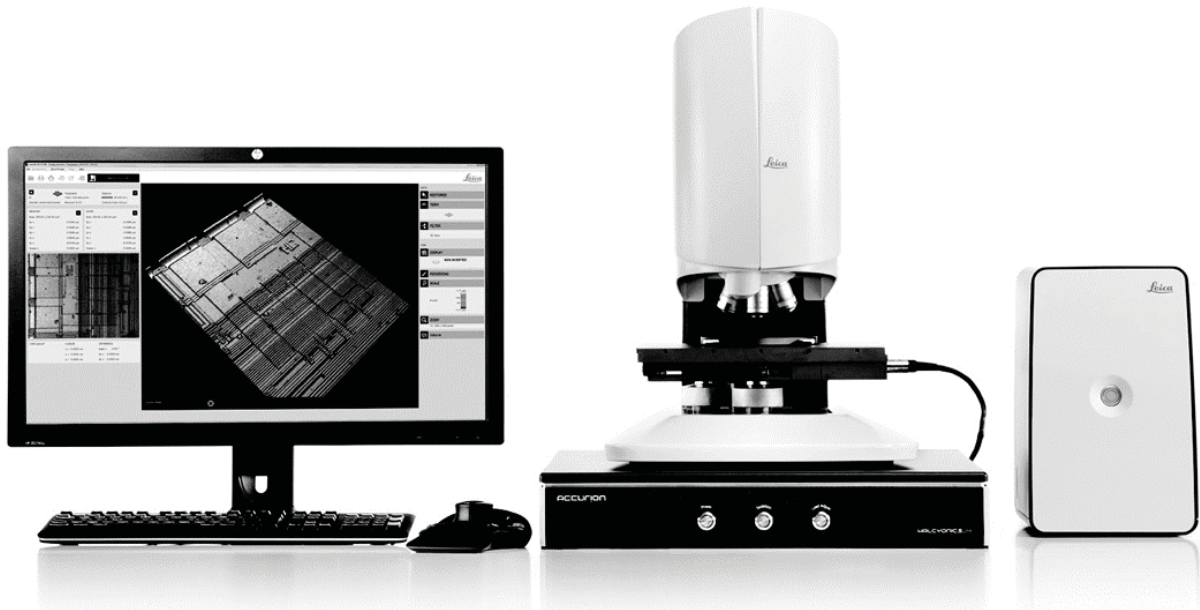
9.20 Präparation der Probenplatte für die mikroskopische Analyse

Nach einem Fallturmversuch werden die Probenplatten präpariert, um 3D-Analysen im Konfokalmikroskop durchführen zu können. Probenplatte 92 mit Einschlügen; rechts vor der Präparation, links nach dem Aufbereiten der Einschlüge



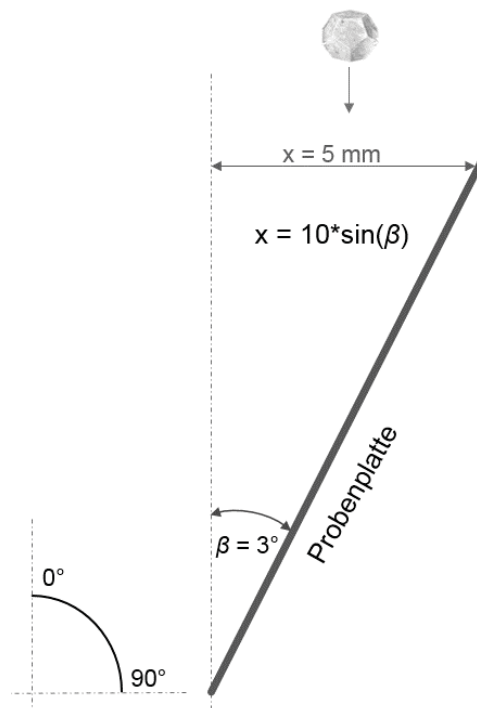
9.21 Konfokalmikroskop

Leica DCM 3D Konfokalmikroskop zur Erfassung der Schädigungsparameter [53]



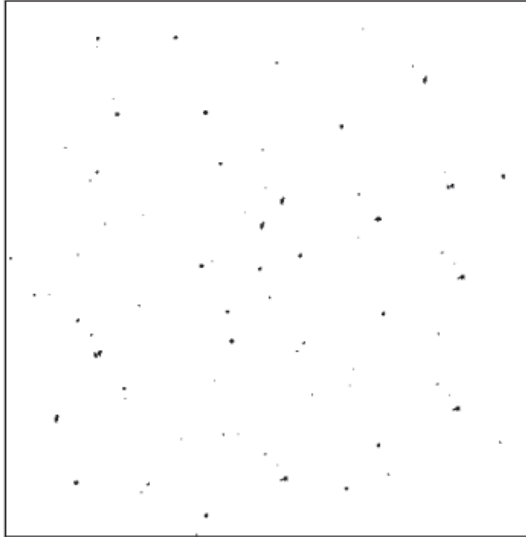
9.22 Limitierung durch kleine Winkel beim Stoßvorgang

Limitierung durch kleine Winkel, die eine kleine projizierte Breite der Probenplatte von beispielweise 5 mm bei einem Auftreffwinkel von $\beta = 3^\circ$ zuließ.

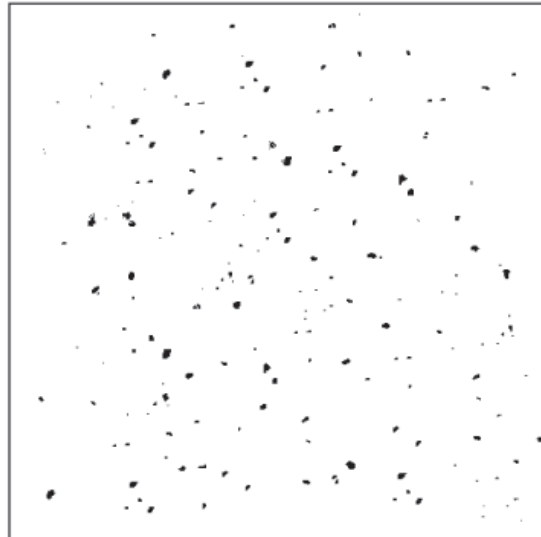


9.23 Grenzwertmuster [49]

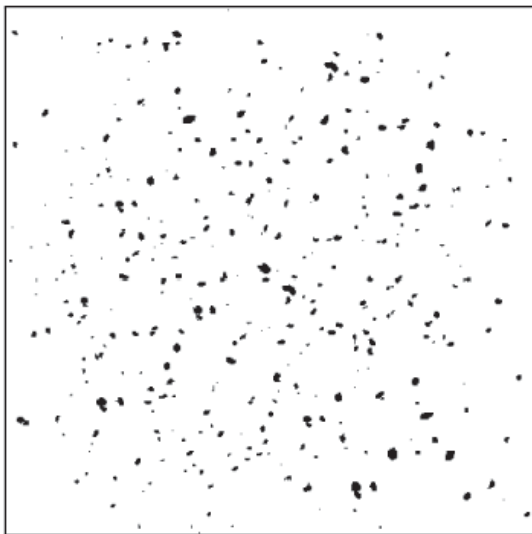
Die nachstehend aufgezeigten Flächenquadrate der Abbildungen zeigen die Zuordnung der Kennwerte zu den entsprechenden Schädigungsbildern nach DIN EN ISO 20567-1. Zur Verdeutlichung ist die maximal zulässige Schädigungsfläche des jeweiligen Kennwerts mit angegeben.



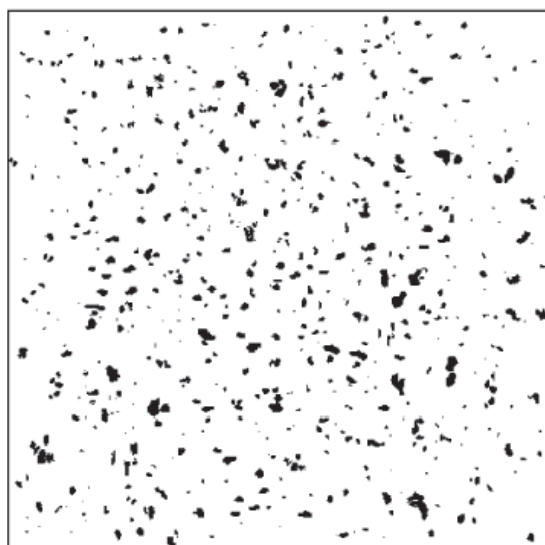
Kennwert 0,5 geschädigte Fläche 0,2 %



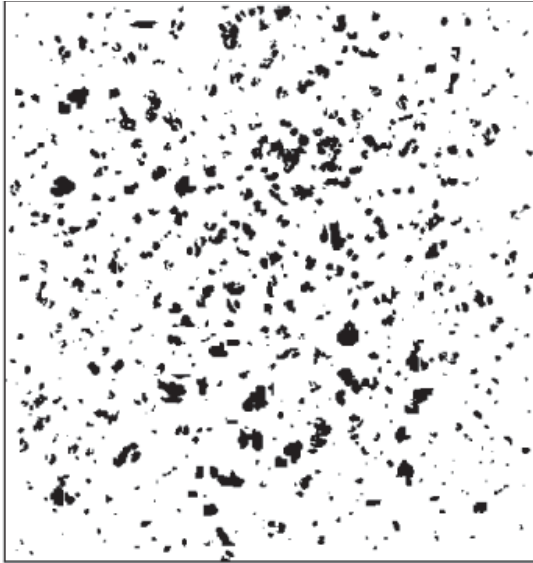
Kennwert 1,0 geschädigte Fläche 1,0 %



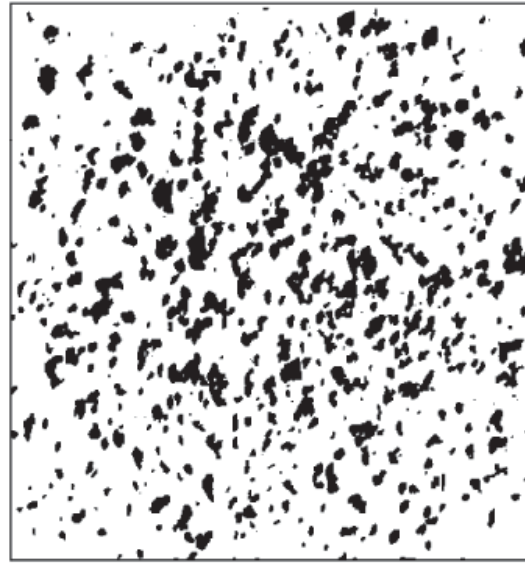
Kennwert 1,5 geschädigte Fläche 2,5 %



Kennwert 2,0 geschädigte Fläche 5,5 %



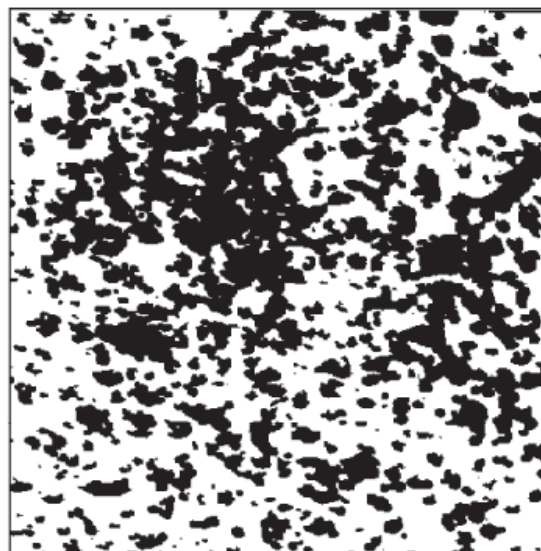
Kennwert 2,5 geschädigte Fläche 10,7 %



Kennwert 3,0 geschädigte Fläche 19,2 %



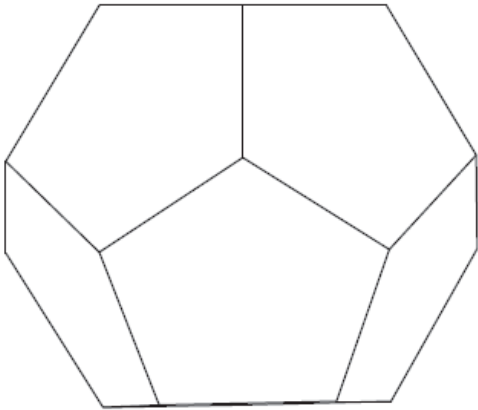
Kennwert 3,5 geschädigte Fläche 29,0 %



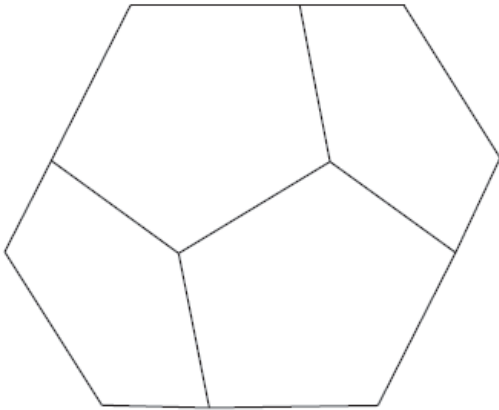
Kennwert 4,0 geschädigte Fläche 43,8 %

9.24 Darstellung eines regelmäßiges Pentagondodekaeder

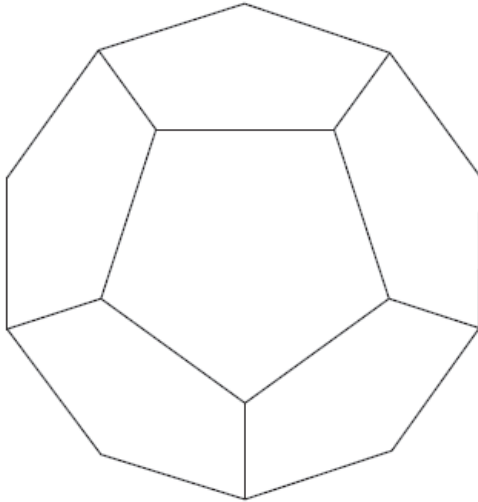
Symmetrische Fünfeckform mit 12 Flächen, 20 Ecken und 30 gleich langen Kanten.



Vorderansicht



Seitenansicht



Draufsicht

9.25: Ergebnisse Konstante Fahrt

Sommerreifen / 40 km/h / 1,5 bar, Versuche: 050, 052, 054, 077, 079

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	8	1	2	5	0
150 – 199	1	0	1	0	0
200 – 249	1	0	0	0	1
250 – 299	1	0	0	1	0
300 – 400	1	1	0	0	0
Gesamt Anzahl	12				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	0	0	0
	<350	0	1	1	0	0	0
	<300	0	1	0	1	1	1
	<250	0	1	1	2	1	1
	<200	1	2	3	2	1	1
	<150	1	8	10	8	6	3
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 40 km/h / 2,1 bar

Versuche: 016, 019, 022, 023, 026, 027, 034, 035, 048, 056, 058

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	10	2	3	5	0
150 – 199	7	1	3	3	0
200 – 249	3	2	1	0	0
250 – 299	5	0	3	2	0
300 – 400	6	5	1	0	0
Gesamt Anzahl	31				

z-Richtung in mm	>350	0	0	4	2	0	0
	>300	0	0	4	2	2	2
	>250	0	4	6	7	5	5
	>200	0	7	9	7	3	3
	>150	0	14	14	9	8	7
	>100	7	28	16	11	11	12
	0	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 40 km/h / 3,5bar; Versuche: 060, 062, 064, 087, 089

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	6	0	4	2	0
150 – 199	0	0	0	0	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	1	0	0	1	0
300 – 400	3	3	0	0	0
Gesamt Anzahl	10				

z-Richtung in mm	<400	0	0	2	1	1	1
	<350	0	1	3	1	0	0
	<300	0	2	1	1	1	1
	<250	0	3	2	1	0	0
	<200	2	4	1	0	0	0
	<150	3	4	6	6	3	1
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 80 km/h / 1,5 bar; Versuche: 051, 053, 055, 078, 080

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	17	1	7	7	2
150 – 199	6	0	3	3	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	2	0	1	1	0
300 – 400	1	0	1	0	0
Gesamt Anzahl	26				

z-Richtung in mm	<400	0	1	0	0	0	0
	<350	0	1	0	0	1	1
	<300	0	1	0	1	1	2
	<250	0	1	1	3	2	2
	<200	1	1	3	2	4	6
	<150	1	3	8	13	20	19
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 80 km/h / 2,1 bar

Versuche: 018, 021, 024, 025, 028, 029, 036, 037, 049, 057, 059

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	34	2	16	16	0
150 – 199	15	0	10	5	0
200 – 249	11	3	5	3	0
250 – 299	6	3	2	1	0
300 – 400	14	6	7	1	0
Gesamt Anzahl	80				

z-Richtung in mm	<400	0	0	3	2	4	6
	<350	0	1	3	6	7	7
	<300	0	3	5	10	9	9
	<250	0	4	9	14	13	15
	<200	1	10	17	21	23	20
	<150	3	23	41	49	44	38
	0	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 80 km/h / 3,5 bar; Versuche: 051, 053, 055, 078, 080

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	8	1	3	3	1
150 – 199	4	2	1	1	0
200 – 249	1	0	1	0	0
250 – 299	1	1	0	0	0
300 – 400	1	0	0	1	0
Gesamt Anzahl	15				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	0
	<350	0	0	0	0	0	1
	<300	0	0	0	0	1	2
	<250	0	0	0	2	3	2
	<200	0	0	2	4	3	4
	<150	0	3	6	9	10	10
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 40 km/h / 1,5 bar; Versuche: 111, 113, 115

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	9	0	4	5	0
150 – 199	1	1	0	0	0
200 – 249	1	1	0	0	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	4	0	3	1	0
Gesamt Anzahl	15				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	1	2	2
	<350	0	0	1	3	3	2
	<300	0	0	3	3	1	0
	<250	0	2	4	2	1	1
	<200	0	4	3	2	1	2
	<150	1	10	10	9	7	5
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 40 km/h / 2,1 bar; Versuche: 117, 119, 121

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	2	0	2	0	0
150 – 199	2	0	2	0	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	1	1	0	0	0
Gesamt Anzahl	5				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	1	0	0
	<350	0	0	1	0	0	0
	<300	0	1	1	0	0	0
	<250	0	1	0	0	0	0
	<200	0	1	1	2	2	1
	<150	1	3	4	3	3	2
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 40 km/h / 3,5 bar; Versuche: 123, 125, 127

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	5	0	2	3	0
150 – 199	2	1	0	1	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	1	0	1	0	0
Gesamt Anzahl	8				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	1	0	0
	<350	0	0	1	0	0	0
	<300	0	1	1	0	0	0
	<250	0	1	0	0	0	0
	<200	0	1	1	2	2	1
	<150	1	5	7	6	6	3
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 80 km/h / 1,5 bar; Versuche: 112, 114, 116

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	10	1	3	5	1
150 – 199	9	1	4	3	1
200 – 249	3	0	2	1	0
250 – 299	4	0	3	1	0
300 – 400	4	0	3	1	0
Gesamt Anzahl	30				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	1	0
	<350	0	0	0	1	2	3
	<300	0	0	1	2	3	6
	<250	0	0	2	4	7	6
	<200	0	2	7	9	10	11
	<150	0	7	20	21	19	14
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 80 km/h / 2,1 bar; Versuche: 118, 120, 122

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	6	1	4	1	0
150 – 199	7	2	3	2	0
200 – 249	3	0	2	1	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	4	1	2	1	0
Gesamt Anzahl	20				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	1	0	1
	<350	0	0	1	0	3	3
	<300	0	0	1	2	3	0
	<250	0	1	2	3	2	3
	<200	0	2	3	6	9	8
	<150	1	6	11	14	10	7
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 80 km/h / 3,5 bar; Versuche: 124, 126, 128

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	7	0	3	4	0
150 – 199	3	0	2	1	0
200 – 249	4	0	3	1	0
250 – 299	2	0	2	0	0
300 – 400	2	0	2	0	0
Gesamt Anzahl	18				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	1	1
	<350	0	0	0	1	1	1
	<300	0	0	0	1	1	3
	<250	0	0	1	3	4	6
	<200	0	1	4	8	7	6
	<150	0	6	10	12	9	8
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.26 Ergebnisse Beschleunigung

Sommerreifen / 0 km/h / 1,5 bar; Versuche: 081, 082, 083, 102, 103

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	16	2	1	11	2
150 – 199	10	1	2	6	1
200 – 249	12	2	4	4	2
250 – 299	2	1	0	1	0
300 – 400	5	2	3	0	0
Gesamt Anzahl	45				

z-Richtung in mm	<400	1	2	1	0	0	0
	<350	3	4	2	0	0	0
	<300	7	6	4	0	0	0
	<250	19	12	4	0	0	0
	<200	29	22	5	0	0	0
	<150	45	30	5	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 0 km/h / 2,1 bar; Versuche: 030, 031, 038, 040, 070

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	6	0	3	3	0
150 – 199	9	2	3	3	1
200 – 249	7	1	4	2	0
250 – 299	2	0	1	1	0
300 – 400	1	0	0	1	0
Gesamt Anzahl	25				

z-Richtung in mm	<400	1	1	0	0	0	0
	<350	1	1	0	0	0	0
	<300	3	3	0	0	0	0
	<250	10	9	0	0	0	0
	<200	19	14	1	0	0	0
	<150	25	19	4	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 0 km/h / 3,5 bar; Versuche: 091, 092, 093, 094, 104

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	11	1	3	7	0
150 – 199	9	1	6	2	0
200 – 249	6	0	3	3	0
250 – 299	3	0	3	0	0
300 – 400	3	0	0	3	0
Gesamt Anzahl	32				

z-Richtung in mm	<400	2	2	0	0	0	0
	<350	3	3	0	0	0	0
	<300	6	6	0	0	0	0
	<250	12	12	0	0	0	0
	<200	21	14	0	0	0	0
	<150	32	21	0	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 40 km/h / 1,5 bar; Versuche: 084, 085, 086, 100, 101

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	13	2	2	5	4
150 – 199	2	0	0	1	1
200 – 249	3	0	0	3	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	1	0	1	0	0
Gesamt Anzahl	19				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	0
	<350	0	0	0	0	0	1
	<300	0	0	0	1	1	1
	<250	0	0	1	2	2	3
	<200	0	1	3	4	4	3
	<150	0	4	12	15	14	12
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 40 km/h / 2,1 bar; Versuche: 074, 075, 076, 098, 099

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine \leq 2 mm	Kategorie 3 Steine \leq 4 mm	Kategorie 2 Steine \leq 7 mm	Kategorie 1 Steine $>$ 7 mm
100 – 149	20	2	5	10	3
150 – 199	7	0	1	5	1
200 – 249	5	0	3	2	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	2	0	2	0	0
Gesamt Anzahl	34				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	1	1
	<350	0	0	0	1	1	1
	<300	0	0	1	2	1	0
	<250	0	0	2	2	4	5
	<200	0	1	5	9	11	8
	<150	0	11	26	28	23	20
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Sommerreifen / 40 km/h / 3,5 bar; Versuche: 095, 096, 097, 105, 106

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine \leq 2 mm	Kategorie 3 Steine \leq 4 mm	Kategorie 2 Steine \leq 7 mm	Kategorie 1 Steine $>$ 7 mm
100 – 149	20	0	8	10	2
150 – 199	14	1	7	4	2
200 – 249	2	1	0	1	0
250 – 299	1	0	0	0	1
300 – 400	5	2	0	3	0
Gesamt Anzahl	42				

z-Richtung in mm	<400	0	1	1	1	2	1
	<350	0	1	0	3	2	1
	<300	0	1	3	4	3	3
	<250	0	2	4	2	2	2
	<200	1	4	6	13	15	15
	<150	2	14	31	31	23	20
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 0 km/h / 1,5 bar; Versuche: 146, 147, 148, 149

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine \leq 2 mm	Kategorie 3 Steine \leq 4 mm	Kategorie 2 Steine \leq 7 mm	Kategorie 1 Steine $>$ 7 mm
100 – 149	2	0	0	1	1
150 – 199	6	0	0	6	0
200 – 249	10	0	4	6	0
250 – 299	9	0	2	6	1
300 – 400	12	0	6	6	0
Gesamt Anzahl	39				

z-Richtung in mm	<400	5	6	0	0	0	0
	<350	11	12	1	0	0	0
	<300	21	18	3	0	0	0
	<250	31	26	6	0	0	0
	<200	37	28	8	0	0	0
	<150	39	31	11	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 0 km/h / 2,1 bar; Versuche: 137, 138, 139

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine \leq 2 mm	Kategorie 3 Steine \leq 4 mm	Kategorie 2 Steine \leq 7 mm	Kategorie 1 Steine $>$ 7 mm
100 – 149	6	0	3	3	0
150 – 199	5	0	2	3	0
200 – 249	6	0	3	3	0
250 – 299	3	0	3	0	0
300 – 400	4	0	4	0	0
Gesamt Anzahl	24				

z-Richtung in mm	<400	4	4	0	0	0	0
	<350	4	4	0	0	0	0
	<300	7	6	1	0	0	0
	<250	13	10	1	0	0	0
	<200	18	13	2	0	0	0
	<150	24	17	2	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 0 km/h / 3,5 bar; Versuche: 134, 135, 136

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	2	0	1	1	0
150 – 199	9	1	2	6	0
200 – 249	5	0	2	3	0
250 – 299	4	0	2	2	0
300 – 400	2	1	1	0	0
Gesamt Anzahl	22				

z-Richtung in mm	<400	1	1	0	0	0	0
	<350	2	2	0	0	0	0
	<300	6	6	0	0	0	0
	<250	11	9	1	0	0	0
	<200	20	16	1	0	0	0
	<150	22	20	1	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 40 km/h / 1,5 bar; Versuche: 143, 144, 145, 150

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	11	0	6	4	1
150 – 199	1	0	1	0	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	0	0	0	0	0
Gesamt Anzahl	12				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	0
	<350	0	0	0	0	0	0
	<300	0	0	0	0	0	0
	<250	0	0	0	0	0	0
	<200	0	0	0	0	0	1
	<150	0	0	5	11	12	12
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 40 km/h / 2,1 bar; Versuche: 140, 141, 142

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	9	1	4	4	0
150 – 199	2	0	2	0	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	0	0	0	0	0
Gesamt Anzahl	11				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	0
	<350	0	0	0	0	0	0
	<300	0	0	0	0	0	0
	<250	0	0	0	0	0	0
	<200	0	0	0	1	2	2
	<150	0	1	5	11	10	11
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Profillose Reifen / 40 km/h / 3,5 bar; Versuche: 131, 132, 133

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	4	0	1	3	0
150 – 199	5	0	0	5	0
200 – 249	0	0	0	0	0
250 – 299	1	0	0	1	0
300 – 400	1	0	1	0	0
Gesamt Anzahl	11				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	1	1	0
	<350	0	0	0	1	0	0
	<300	0	0	1	1	1	1
	<250	0	0	1	1	1	0
	<200	0	1	2	5	5	5
	<150	1	5	8	9	5	4
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.27 Ergebnisse konstante Fahrt mit 40 km/h

Winter Reifen / 40 km/h / 1,5 bar; Versuche: 164,1 66, 169, 226, 228

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	8	0	3	5	0
150 – 199	10	2	7	1	0
200 – 249	4	0	2	2	0
250 – 299	2	1	0	1	0
300 – 400	5	0	2	3	0
Gesamt Anzahl	29				

z-Richtung in mm	<400	0	0	2	1	1	1
	<350	0	0	3	1	1	1
	<300	0	2	4	3	2	2
	<250	0	4	7	6	5	6
	<200	0	10	11	10	8	8
	<150	4	19	17	12	12	9
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 40 km/h / 2,3 bar; Versuche: 151, 153, 157, 232, 234

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	8	2	3	3	0
150 – 199	6	0	4	1	1
200 – 249	1	0	0	0	1
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	5	2	2	1	0
Gesamt Anzahl	20				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	1	0	0
	<350	0	0	3	3	3	3
	<300	0	1	4	2	1	0
	<250	0	3	4	1	1	1
	<200	0	5	7	7	5	2
	<150	4	17	15	10	12	9
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 40 km/h / 3,5 bar; Versuche: 177, 179, 183, 194, 196

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	3	0	0	3	0
150 – 199	12	1	6	5	0
200 – 249	2	0	1	0	1
250 – 299	2	0	1	1	0
300 – 400	6	0	3	2	1
Gesamt Anzahl	25				

z-Richtung in mm	<400	0	1	1	3	3	0
	<350	0	1	3	5	2	2
	<300	1	2	5	4	2	2
	<250	1	4	8	4	3	3
	<200	2	9	17	12	12	12
	<150	5	23	16	4	4	11
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 40 km/h / 2,3 bar/ Regennasse Fahrbahn

Versuche: 238, 240, 244, 247, 250

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	4	1	2	1	0
150 – 199	9	0	5	4	0
200 – 249	2	0	0	2	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	3	0	2	1	0
Gesamt Anzahl	18				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	1	0	0
	<350	0	0	1	2	2	2
	<300	0	0	2	2	1	0
	<250	0	2	3	3	2	2
	<200	0	3	9	11	9	8
	<150	2	18	15	7	7	12
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.28 Ergebnisse konstante Fahrt mit 80 km/h

Winter Reifen / 80 km/h / 1,5 bar; Versuche: 165, 167, 171, 227, 229

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	16	0	2	11	3
150 – 199	11	0	3	8	0
200 – 249	3	0	2	1	0
250 – 299	3	0	2	1	0
300 – 400	9	2	4	3	0
Gesamt Anzahl	42				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	4	5	2
	<350	0	0	1	6	4	3
	<300	0	0	5	5	4	4
	<250	0	2	8	4	6	5
	<200	0	7	8	9	12	11
	<150	2	13	21	25	24	20
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 80 km/h / 2,3 bar; Versuche: 152, 154, 158, 233, 235

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	15	0	4	10	1
150 – 199	6	0	2	3	1
200 – 249	6	1	1	4	0
250 – 299	2	0	1	1	0
300 – 400	4	2	1	1	0
Gesamt Anzahl	33				

z-Richtung in mm	<400	0	1	0	0	1	1
	<350	0	1	0	1	1	2
	<300	0	1	1	1	2	4
	<250	1	0	1	3	6	8
	<200	1	1	6	12	12	7
	<150	1	9	19	24	18	16
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 80 km/h / 3,5 bar; Versuche: 178, 180, 184, 195, 197

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	14	1	5	8	0
150 – 199	19	0	11	8	0
200 – 249	4	0	1	2	1
250 – 299	3	0	2	1	0
300 – 400	4	1	1	2	0
Gesamt Anzahl	44				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	1	1	2
	<350	0	0	1	2	3	2
	<300	0	0	2	3	3	3
	<250	0	1	4	5	4	6
	<200	0	3	6	12	20	21
	<150	1	7	33	35	28	18
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 80 km/h / 2,3 bar; Regennasse Fahrbahn

Versuche: 239, 241, 245, 248, 251

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	15	2	8	5	0
150 – 199	11	2	4	5	0
200 – 249	4	1	2	1	0
250 – 299	2	0	0	2	0
300 – 400	5	2	2	1	0
Gesamt Anzahl	37				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	1	3	3
	<350	0	0	1	3	3	1
	<300	0	1	4	4	1	2
	<250	0	1	4	3	5	5
	<200	0	4	5	8	11	12
	<150	1	9	20	29	24	19
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.29 Ergebnisse mit Beschleunigung von 0 km/h

Winter Reifen / 0 km/h / 1,5 bar; Versuche: 173, 174, 175, 176, 278

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	6	3	2	1	0
150 – 199	7	4	1	1	1
200 – 249	6	1	3	2	0
250 – 299	4	1	2	1	0
300 – 400	7	4	2	1	0
Gesamt Anzahl	30				

z-Richtung in mm	<400	2	5	0	0	0	0
	<350	6	6	0	0	0	0
	<300	10	11	0	0	0	0
	<250	15	16	0	0	0	0
	<200	18	17	0	0	0	0
	<150	19	19	2	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 0 km/h / 2,3 bar; Versuche: 160, 161, 162, 163, 272

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	7	4	1	2	0
150 – 199	4	4	0	0	0
200 – 249	4	1	0	2	1
250 – 299	5	2	2	1	0
300 – 400	3	1	2	0	0
Gesamt Anzahl	23				

z-Richtung in mm	<400	3	3	0	0	0	0
	<350	3	3	0	0	0	0
	<300	5	6	1	0	0	0
	<250	11	9	1	0	0	0
	<200	12	13	4	0	0	0
	<150	13	13	7	1	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 0 km/h / 3,5 bar; Versuche: 187, 188, 274, 275, 276

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	4	0	2	2	0
150 – 199	6	0	5	1	0
200 – 249	2	0	2	0	0
250 – 299	2	0	2	0	0
300 – 400	3	0	1	2	0
Gesamt Anzahl	17				

z-Richtung in mm	<400	2	0	0	0	0	0
	<350	1	1	0	0	0	0
	<300	3	3	1	0	0	0
	<250	4	5	3	1	0	0
	<200	9	9	2	2	0	0
	<150	12	13	2	2	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 0 km/h / 2,3 bar; Regennasse Fahrbahn

Versuche: 253, 254, 255, 256, 257

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	0	0	0	0	0
150 – 199	3	0	0	1	2
200 – 249	5	0	1	4	0
250 – 299	0	0	0	0	0
300 – 400	10	1	2	5	2
Gesamt Anzahl	18				

z-Richtung in mm	<400	7	6	1	0	0	0
	<350	10	9	0	0	0	0
	<300	9	8	0	0	0	0
	<250	8	11	0	0	0	0
	<200	10	12	3	0	0	0
	<150	9	12	3	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.30 Ergebnisse mit Beschleunigung von 0 km/h Testfahrer

Winter Reifen / 0 km/h / 1,5 bar; Versuche: 222, 223, 224, 225

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	13	2	7	4	0
150 – 199	5	1	2	2	0
200 – 249	4	0	3	1	0
250 – 299	5	0	1	4	0
300 – 400	6	3	1	2	0
Gesamt Anzahl	33				

z-Richtung in mm	<400	2	4	0	0	0	0
	<350	5	5	2	0	0	0
	<300	8	8	3	0	0	0
	<250	12	11	7	1	0	0
	<200	13	11	8	3	0	0
	<150	20	22	10	6	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 0 km/h / 2,3 bar; Versuche: 212, 213, 214, 215

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	2	0	2	0	0
150 – 199	8	0	6	2	0
200 – 249	5	1	3	1	0
250 – 299	4	2	1	1	0
300 – 400	7	1	4	2	0
Gesamt Anzahl	26				

z-Richtung in mm	<400	3	2	2	2	1	1
	<350	3	3	2	1	1	0
	<300	9	8	2	1	1	1
	<250	13	12	2	2	1	1
	<200	20	16	4	2	2	1
	<150	16	16	7	4	2	3
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 0 km/h / 3,5 bar; Versuche: 216, 217, 218, 220

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	3	0	3	0	0
150 – 199	1	1	0	0	0
200 – 249	4	0	3	1	0
250 – 299	1	1	0	0	0
300 – 400	2	0	2	0	0
Gesamt Anzahl	11				

z-Richtung in mm	<400	1	2	2	0	0	0
	<350	2	1	2	0	0	0
	<300	3	0	1	0	0	0
	<250	7	5	0	0	0	0
	<200	7	6	1	0	0	0
	<150	7	6	1	0	0	0
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.31 Ergebnisse mit Beschleunigung von 40 km/h

Winter Reifen / 40 km/h / 1,5 bar; Versuche: 168, 170, 172, 230, 231

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	25	1	9	14	1
150 – 199	9	0	6	3	0
200 – 249	3	0	1	2	0
250 – 299	2	0	0	2	0
300 – 400	0	0	0	0	0
Gesamt Anzahl	39				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	0	0	
	<350	0	0	0	0	0	
	<300	0	0	0	0	2	
	<250	0	0	0	2	4	5
	<200	0	0	5	11	11	9
	<150	0	10	30	33	28	27
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 40 km/h / 2,3 bar; Versuche: 155, 156, 159, 236, 237

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	21	2	7	10	2
150 – 199	10	1	5	2	2
200 – 249	2	0	1	1	0
250 – 299	4	2	0	2	0
300 – 400	3	0	1	2	0
Gesamt Anzahl	40				

z-Richtung in mm	<400	0	0	0	2	2	1
	<350	0	0	0	2	1	0
	<300	0	0	2	2	2	4
	<250	0	2	3	5	5	4
	<200	0	3	6	9	9	11
	<150	0	11	28	30	27	22
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 40 km/h / 3,5 bar; Versuche: 181, 182, 185, 198,199

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	19	1	8	6	4
150 – 199	17	1	11	5	0
200 – 249	2	0	1	1	0
250 – 299	5	2	2	1	0
300 – 400	2	0	2	0	0
Gesamt Anzahl	45				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	0	0	0
	<350	0	0	1	0	0	1
	<300	0	1	1	0	4	6
	<250	0	1	0	6	8	4
	<200	0	1	10	19	16	17
	<150	1	16	39	33	25	23
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

Winter Reifen / 40 km/h / 2,3 bar; Regennasse Fahrbahn

Versuche: 242, 243, 246, 252

Steinflughöhe in Z-Richtung in mm	Anzahl der detektierten Steine	Kategorie 4 Steine ≤ 2 mm	Kategorie 3 Steine ≤ 4 mm	Kategorie 2 Steine ≤ 7 mm	Kategorie 1 Steine > 7 mm
100 – 149	10	1	5	4	0
150 – 199	4	1	2	1	0
200 – 249	4	0	2	2	0
250 – 299	1	0	0	1	0
300 – 400	4	1	2	1	0
Gesamt Anzahl	23				

z-Richtung in mm	<400	0	0	1	0	2	3
	<350	0	0	1	2	3	1
	<300	0	1	3	3	2	1
	<250	0	1	3	2	4	4
	<200	0	4	7	7	8	3
	<150	1	12	16	14	12	10
	100	<500	<1000	<1500	<2000	<2500	<3000
x-Richtung in mm							

9.32 Versuchsdatenbank

Messfahrt	Datum	Jahr	Prüfstrecke	Strecken-zustand	Be-feuch-tung	Geschwin-digkeit [km/h]	Reifen-typ	Reifen-luft-druck [bar]	Reifen-profil-tiefe [mm]	Umgebungs-temperatur (Fahrzeug) [°C]	Luftfeucht-igkeit (Neustadt) [%]	Fahrzustand
1	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	-	60,33	konstante Fahrt
2	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	-	56,13	konstante Fahrt
3	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	-	57,92	konstante Fahrt
4	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	-	53,01	konstante Fahrt
5	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	-	56,67	konstante Fahrt
6	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	-	49,25	konstante Fahrt
7	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Ja	60	Sommer	2,1	6	-	52,87	konstante Fahrt
8	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Ja	60	Sommer	2,1	6	-	49,48	konstante Fahrt
9	15. Mai	2013	Splitt	trocken	Ja	60	Sommer	2,1	6	-	43,21	konstante Fahrt
10	06. Jun	2013	Splitt	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	24	-	konstante Fahrt
11	06. Jun	2013	Splitt	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	24,5	-	konstante Fahrt
12	06. Jun	2013	Splitt	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	25,5	-	konstante Fahrt
13	06. Jun	2013	Splitt	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	26,5	-	konstante Fahrt
14	06. Jun	2013	Splitt	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	27	-	konstante Fahrt
15	06. Jun	2013	Splitt	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	26	-	konstante Fahrt
16	11. Jun	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	20	70,3	konstante Fahrt

17	11. Jun	2013	Korrosion	trocken	Nein	60	Sommer	2,1	6	20	63,14	konstante Fahrt
18	11. Jun	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	20	61,97	konstante Fahrt
19	11. Jun	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	20	62,44	konstante Fahrt
20	11. Jun	2013	Korrosion	trocken	Nein	60	Sommer	2,1	6	20	64,46	konstante Fahrt
21	11. Jun	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	20	68,67	konstante Fahrt
22	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	19,5	61,97	konstante Fahrt
23	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	19,5	63,76	konstante Fahrt
24	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	19,5	61,27	konstante Fahrt
25	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	19,5	58,62	konstante Fahrt
26	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	19,5	61,74	konstante Fahrt
27	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	19,5	53,32	konstante Fahrt
28	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	21	53,09	konstante Fahrt
29	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	21,5	49,09	konstante Fahrt
30	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	2,1	6	21,5	49,64	Beschleunigung
31	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	2,1	6	21,5	47,21	Beschleunigung
32	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	2,1	6	21,5	48,94	Beschleunigung
33	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	2,1	6	21,5	46,9	Beschleunigung
34	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	21,5	45,56	konstante Fahrt
35	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	21,5	43,76	konstante Fahrt
36	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	21,5	44,31	konstante Fahrt
37	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	21,5	45,48	konstante Fahrt
38	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	2,1	6	21,5	45,01	Beschleunigung
39	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	2,1	6	21,5	45,56	Beschleunigung
40	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	2,1	6	21,5	41,64	Beschleunigung
41	02. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	2,1	6	21,5	44,15	Beschleunigung
42	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	24,5	38,26	konstante Fahrt
43	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	24,5	39,13	konstante Fahrt
44	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	24,5	40,07	konstante Fahrt
45	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	24,5	39,83	konstante Fahrt
46	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	24,5	39,21	konstante Fahrt
47	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	24,5	38,11	konstante Fahrt
48	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	24,5	29,71	konstante Fahrt
49	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	24,5	30,81	konstante Fahrt
50	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	1,5	6	24,5	27,59	konstante Fahrt
51	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	1,5	6	24,5	28,22	konstante Fahrt
52	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	1,5	6	24,5	28,38	konstante Fahrt
53	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	1,5	6	25	28,77	konstante Fahrt
54	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	1,5	6	25	28,77	konstante Fahrt
55	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	1,5	6	25	27,44	konstante Fahrt
56	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	25	28,14	konstante Fahrt
57	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	25	28,14	konstante Fahrt
58	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	25	29,63	konstante Fahrt
59	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	2,1	6	25	27,67	konstante Fahrt
60	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	3,5	6	25,5	30,18	konstante Fahrt

61	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	3,5	6	25,5	25,55	konstante Fahrt
62	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	3,5	6	25,5	25,48	konstante Fahrt
63	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	3,5	6	25,5	26,34	konstante Fahrt
64	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	3,5	6	25,5	26,34	konstante Fahrt
65	22. Jul	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	3,5	6	25,5	26,34	konstante Fahrt
66	08. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	23	64,31	Verzögerung
67	08. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	23	61,66	Verzögerung
68	08. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	23	62,59	konstante Fahrt
69	08. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	60	Sommer	2,1	6	23	59,08	konstante Fahrt
70	14. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	2,1	6	19	47,92	Beschleunigung
71	14. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	19	50,43	Verzögerung
72	14. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	19	49,8	Verzögerung
73	14. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	2,1	6	19	47,6	Verzögerung
74	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	19,5	57,92	Beschleunigung
75	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	19,5	55,5	Beschleunigung
76	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	2,1	6	19,5	57,61	Beschleunigung
77	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	1,5	6	20	54,88	konstante Fahrt
78	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	1,5	6	20,5	53,79	konstante Fahrt
79	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Sommer	1,5	6	20,5	54,02	konstante Fahrt
80	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Sommer	1,5	6	20,5	53,87	konstante Fahrt
81	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Sommer	1,5	6	20,5	55,27	Beschleunigung
82	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	1,5	6	20,5	52,31	Beschleunigung
83	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	1,5	6	20,5	49,17	Beschleunigung
84	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	1,5	6	21	41,64	Beschleunigung
85	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	1,5	6	21	41,48	Beschleunigung
86	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	1,5	6	21	42,89	Beschleunigung
87	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	3,5	6	21,5	37,56	konstante Fahrt
88	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	3,5	6	21,5	37,48	konstante Fahrt
89	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	3,5	6	21,5	34,81	konstante Fahrt
90	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Sommer	3,5	6	21,5	35,2	konstante Fahrt
91	16. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	3,5	6	21,5	34,66	Beschleunigung
92	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	3,5	6	17,5	44,23	Beschleunigung
93	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	3,5	6	17,5	45,8	Beschleunigung
94	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	3,5	6	17,5	45,09	Beschleunigung
95	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	3,5	6	17,5	46,03	Beschleunigung
96	21. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	40	Sommer	3,5	6	17,5	44,31	Beschleunigung
97	21. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	40	Sommer	3,5	6	17,5	46,35	Beschleunigung
98	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	18	46,9	Beschleunigung
99	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	2,1	6	18	49,64	Beschleunigung
100	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	1,5	6	18	50,19	Beschleunigung
101	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	1,5	6	18	50,9	Beschleunigung
102	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	1,5	6	18	50,03	Beschleunigung
103	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	1,5	6	18	63,91	Beschleunigung
104	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Sommer	3,5	6	18	65,55	Beschleunigung

105	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	3,5	6	18	71,55	Beschleunigung
106	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Sommer	3,5	6	18	71,94	Beschleunigung
107	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	-	0	Sommer	3,5	6	18	71,63	Beschleunigung
108	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	-	80	Sommer	3,5	6	18	70,54	konstante Fahrt
109	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	-	80	Sommer	3,5	6	18	72,41	konstante Fahrt
110	21. Aug	2013	Korrosion	trocken	-	80	Sommer	3,5	6	18	76,15	konstante Fahrt
111	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	16,5	-	konstante Fahrt
112	29. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Slick	1,5	-	16,5	-	konstante Fahrt
113	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	16,5	-	konstante Fahrt
114	29. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Slick	1,5	-	16,5	-	konstante Fahrt
115	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	16,5	-	konstante Fahrt
116	29. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Slick	1,5	-	17	-	konstante Fahrt
117	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	2,1	-	17,5	-	konstante Fahrt
118	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	2,1	-	17,5	-	konstante Fahrt
119	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	2,1	-	17,5	-	konstante Fahrt
120	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	2,1	-	17,5	-	konstante Fahrt
121	29. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	40	Slick	2,1	-	17,5	-	konstante Fahrt
122	29. Aug	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Slick	2,1	-	17,5	-	konstante Fahrt
123	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
124	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
125	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
126	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
127	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
128	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
129	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
130	29. Aug	2013	Korrosion	trocken	Ja	80	Slick	3,5	-	17,5	-	konstante Fahrt
131	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	3,5	-	22	61,42	Beschleunigung
132	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	3,5	-	22	59,79	Beschleunigung
133	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	3,5	-	22	59,79	Beschleunigung
134	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	3,5	-	22	58,7	Beschleunigung
135	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	3,5	-	22	55,97	Beschleunigung
136	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	3,5	-	22	58,15	Beschleunigung
137	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	2,1	-	22	54,65	Beschleunigung
138	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	2,1	-	22	54,65	Beschleunigung
139	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	2,1	-	22	53,32	Beschleunigung
140	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	2,1	-	22	48,15	Beschleunigung
141	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	2,1	-	22	48,86	Beschleunigung
142	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	2,1	-	22	48,46	Beschleunigung
143	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	23	46,9	Beschleunigung
144	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	23	49,8	Beschleunigung
145	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	23	49,96	Beschleunigung
146	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	1,5	-	23	46,74	Beschleunigung
147	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	1,5	-	23	49,96	Beschleunigung
148	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	1,5	-	23	46,9	Beschleunigung

149	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	0	Slick	1,5	-	23	46,9	Beschleunigung
150	05. Sep	2013	Korrosion	trocken	Ja	40	Slick	1,5	-	23	45,64	Beschleunigung

Mess-fahrt	Datum	Jahr	Prüf-strecke	Strecken-zustand	Be-feuch-tung	Geschwin-digkeit [km/h]	Reifen-tyt	Reifen-luft-druck [bar]	Reifen-profil-tiefe [mm]	Umgebungs-temperatur (Fahrzeug) [°C]	Luftfeuchtigkeit (Neustadt) [%]	Fahrzustand
151	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	4,5	98,58	konstante Fahrt
152	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	5	98,82	konstante Fahrt
153	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	5	99,13	konstante Fahrt
154	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	5	99,21	konstante Fahrt
155	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	5	99,36	Beschleunigung
156	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	5	99,36	Beschleunigung
157	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	5	99,36	konstante Fahrt
158	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	5	99,05	konstante Fahrt
159	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	5	97,33	Beschleunigung
160	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	5	94,76	Beschleunigung
161	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	5	94,76	Beschleunigung
162	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	5	95,23	Beschleunigung
163	19. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	5	95,86	Beschleunigung
164	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	4,5	69,52	konstante Fahrt
165	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	1,5	6,5	4,5	72,25	konstante Fahrt
166	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	4,5	72,41	konstante Fahrt
167	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	1,5	6,5	4,5	70,62	konstante Fahrt
168	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	4,5	71,08	Beschleunigung
169	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	4,5	68,9	konstante Fahrt
170	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	4,5	66,1	Beschleunigung
171	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	1,5	6,5	4,5	67,66	konstante Fahrt
172	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	4,5	68,43	Beschleunigung
173	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	4,5	68,59	Beschleunigung
174	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	4,5	69,6	Beschleunigung
175	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	4,5	68,9	Beschleunigung
176	26. Nov	2013	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	4,5	67,42	Beschleunigung
177	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	3,5	6,5	8	73,89	konstante Fahrt
178	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	3,5	6,5	8	72,87	konstante Fahrt
179	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	3,5	6,5	8	73,03	konstante Fahrt
180	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	3,5	6,5	8	73,03	konstante Fahrt
181	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	3,5	6,5	8	72,72	Beschleunigung
182	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	3,5	6,5	8	72,49	Beschleunigung
183	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	3,5	6,5	8	72,25	konstante Fahrt
184	09. Dez	2013	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	3,5	6,5	8	72,25	konstante Fahrt
185	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	97,49	Beschleunigung
186	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6	96,48	Beschleunigung
187	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6	96,4	Beschleunigung
188	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6	96,48	Beschleunigung
189	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Winter	3,5	6,5	6	96,4	Verzögerung
190	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Winter	3,5	6,5	6	96,09	Verzögerung
191	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	80	Winter	3,5	6,5	6	96,17	Verzögerung
192	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	96,71	Verzögerung
193	12. Dez	2013	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	96,79	Verzögerung
194	22. Jan	2014	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	86,74	konstante Fahrt
195	22. Jan	2014	Korrosion	feucht	Nein	80	Winter	3,5	6,5	6	86,51	konstante Fahrt
196	22. Jan	2014	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	86,35	konstante Fahrt

197	22. Jan	2014	Korrosion	feucht	Nein	80	Winter	3,5	6,5	6	86,35	konstante Fahrt
198	22. Jan	2014	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	86,74	Beschleunigung
199	22. Jan	2014	Korrosion	feucht	Nein	40	Winter	3,5	6,5	6	83,94	Beschleunigung
200	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	3,5	84,79	konstante Fahrt
201	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	86,35	konstante Fahrt
202	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	3,5	86,66	konstante Fahrt
203	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	86,27	konstante Fahrt
204	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	3,5	85,73	Beschleunigung
205	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	86,74	konstante Fahrt
206	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	85,81	Verzögerung
207	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	87,13	konstante Fahrt
208	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	87,21	Verzögerung
209	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	86,58	konstante Fahrt
210	29. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	3,5	87,05	konstante Fahrt
211	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	6,5	86,82	Beschleunigung
212	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	6,5	86,58	Beschleunigung
213	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	6,5	85,42	Beschleunigung
214	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	6,5	84,72	Beschleunigung
215	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	6,5	83,94	Beschleunigung
216	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6,5	81,99	Beschleunigung
217	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6,5	81,99	Beschleunigung
218	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6,5	81,68	Beschleunigung
219	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6,5	81,68	Beschleunigung
220	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	6,5	81,21	Beschleunigung
221	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	6,5	80,66	Beschleunigung
222	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	6,5	80,98	Beschleunigung
223	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	6,5	79,65	Beschleunigung
224	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	6,5	78,56	Beschleunigung
225	31. Jan	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	6,5	78,64	Beschleunigung
226	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	1	95,7	konstante Fahrt
227	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	1,5	6,5	1	95,93	konstante Fahrt
228	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	1	95,16	konstante Fahrt
229	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	1,5	6,5	1	94,61	konstante Fahrt
230	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	1	94,92	Beschleunigung
231	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	1,5	6,5	1	95	Beschleunigung
232	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	1	93,75	konstante Fahrt
233	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	1	93,21	konstante Fahrt
234	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	1	92,82	konstante Fahrt
235	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	2	91,18	konstante Fahrt
236	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	2	90,64	Beschleunigung
237	05. Feb	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	2	90,25	Beschleunigung
238	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	7	86,04	konstante Fahrt
239	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	7	85,26	konstante Fahrt
240	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	7	84,72	konstante Fahrt
241	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	7	83,94	konstante Fahrt
242	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	7	83,16	Beschleunigung
243	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	7	83,04	Beschleunigung
244	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	6,5	82,69	konstante Fahrt
245	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	6,5	82,07	konstante Fahrt
246	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	6,5	82,15	Beschleunigung
247	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	6,5	81,91	konstante Fahrt
248	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	6,5	81,75	konstante Fahrt
249	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	6,5	80,66	Beschleunigung
250	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	6,5	80,59	konstante Fahrt

251	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	6,5	80,35	konstante Fahrt
252	27. Feb	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	6,5	81,83	Beschleunigung
253	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	36,62	Beschleunigung
254	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	32,69	Beschleunigung
255	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	32,46	Beschleunigung
256	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	27,52	Beschleunigung
257	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	27,67	Beschleunigung
258	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	28,38	Beschleunigung
259	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	0	Winter	2,3	6,5	10	28,77	Beschleunigung
260	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	10	27,2	Verzögerung
261	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	80	Winter	2,3	6,5	10	27,83	Verzögerung
262	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	10	27,83	Verzögerung
263	11. Mrz	2014	Korrosion	nass	Ja	40	Winter	2,3	6,5	10	26,81	Verzögerung
264	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	14	38,89	konstante Fahrt
265	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	14	35,66	konstante Fahrt
266	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	14	37,08	Beschleunigung
267	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	14	33,54	Beschleunigung
268	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	14	38,49	konstante Fahrt
269	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	80	Winter	2,3	6,5	14	34,87	konstante Fahrt
270	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	40	Winter	2,3	6,5	14	33,53	Beschleunigung
271	01. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	14	33,92	Beschleunigung
272	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	14		Beschleunigung
273	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	2,3	6,5	14		Beschleunigung
274	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	16,5		Beschleunigung
275	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	16,5		Beschleunigung
276	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	16,5		Beschleunigung
277	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	3,5	6,5	16,5		Beschleunigung
278	08. Apr	2014	Korrosion	trocken	Nein	0	Winter	1,5	6,5	16,5		Beschleunigung

