

# **Prognose des Steinschlags und der induzierten Korrosion am Fahrzeug**

Der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg  
zur Erlangung des Grades

**D O K T O R - I N G E N I E U R**

vorgelegt von

Andreas Schönberger

Erlangen – (2012)

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät der  
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 08. 06. 2012

Tag der Promotion: 27. 08. 2012

Dekan: Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Berichterstatter: Frau Prof. Dr. sc. techn. Sannakaisa Virtanen  
Herr Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ferdinand Hofer

## **Danksagung**

Mein Dank gilt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Sannakaisa Virtanen für die steti-  
ge Unterstützung während meiner Promotion, die Diskussionen und Anregungen,  
sowie die mir überlassenen Freiräume in der Gestaltung meiner Arbeit. Die freundli-  
chen Treffen werden mir in guter Erinnerung bleiben.

Für meine Betreuung bei der BMW AG möchte ich Herrn Dr. Volker Giese danken,  
der mich stets unterstützt hat und mir mit seiner konstruktiven Kritik und seinen vie-  
len Ideen immer wieder neue Anregungen gegeben hat. Auch für die gute Förderung  
und das nette Arbeitsklima möchte ich mich sehr bei Hr. Dr. Volker Giese bedanken.  
Mein Dank richtet sich auch an die Kollegen des Korrosionsschutzes, die mich immer  
tatkräftig unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. Ferdinand Hofer, Ing. Hartmuth Schröttner und dem gesamten Felmi-  
ZFE-Team danke ich für die gute Zusammenarbeit in einem immer freundlichen Ar-  
beitsklima im Austrian Cooperative Research Projekt.

In diesem Zuge möchte ich auch dem ACR-Projekt für die Finanzierung von Unter-  
suchungen am Zentrum für Elektronenmikroskopie danken.

Desweiteren haben auch die von mir betreuten Diplomanden ihren Anteil am Entste-  
hen dieser Arbeit, wofür ich mich bei Herrn Christoph Stefan, Herrn Elias Pohl und  
Herrn Theo Pistorius bedanken möchte.

Schließlich gilt mein ganz persönlicher Dank meiner Frau und meinen Eltern, die  
mich während meiner Promotion immer unterstützt haben und nicht nur dadurch ih-  
ren Beitrag zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit geleistet haben.

## Zusammenfassung

Der Korrosionsschutz von Fahrzeugen ist ein wichtiges Merkmal für die Qualität eines Premium-Fahrzeugs. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, gibt es standardisierte Versuche an Bauteilen sowie am Gesamtfahrzeug. Jedoch korrelieren diese Tests nicht immer mit Daten aus dem Feld. Auch die späte Durchführung dieser Korrosionstests im Entwicklungsprozess birgt Schwierigkeiten.

Um frühzeitig Aussagen über Belastungszustände und -zonen zu erhalten, ist es nötig eine virtuelle Simulation aufzubauen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Modell des Steinbewurfs von Fahrzeugen aufzustellen und eine Prognose des Korrosionsfortschritts an einzelnen Defekten von polymerbeschichteten Komponenten zu generieren. Zusätzlich soll eine Methode zur zerstörungsfreien Analyse des Korrosionsfortschritts erarbeitet werden.

Zur Bestimmung spezifischer Steinflugbahnen im Fahrbetrieb wurden Untersuchungen mit mehreren Hochgeschwindigkeitskameras durchgeführt. Hierbei sind die Mechanismen der Steinmitnahme durch den Reifen ermittelt und so die Startbedingungen für eine Steinschlagsimulation bestimmt worden. Um Reflektionen von Steinen in der Simulation darzustellen, wurde der Impulsverlust an verschiedenen Materialien mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmt und das Ergebnismodell in die Simulation integriert.

Erzeugte Schäden an Beschichtungssystemen und der anschließende Korrosionsfortschritt wurde mit der Puls-Phasen-Thermographie untersucht und die Methode mit zerstörenden Prüfungen verifiziert. Zur Bestimmung des Materialabtrags wurden Komponenten von Kundenfahrzeugen mit zerstörenden Analysemethoden untersucht. Ermittelte Materialabtragsraten wurden mit ortsspezifischen Umwelteinflussgrößen korreliert und ein empirisches Modell des korrosiven Abtrags an dynamisch belasteten Komponenten aufgestellt. Als Basis des empirischen Modells wurden bereits bestehende empirische Materialabtragsmodelle von statisch ausgelagerten Proben genutzt.

Das Fazit der Arbeit ist ein Modell des Steinbewurfs von Fahrzeugen, das eine Simulation und Detektion gefährdeter Steinschlagbereiche am Fahrzeug in einer frühen Entwicklungsphase ermöglicht. Zusätzlich kann ein Grenzwert des Korrosionsfortschritts ausgehend von einzelnen Defekten eines Steinschlags an polymerbeschichtetem Stahl ortsspezifisch errechnet werden. Hierbei wurde ermittelt, dass

der Korrosionsfortschritt durch Steinschlag einen weitaus geringeren Materialabtrag zur Folge hat, im Vergleich zu dauerfeuchten Regionen und Schweißnahtbereichen.

## **Abstract**

Corrosion protection is an important attribute of the quality of premium cars. To satisfy the customer and to guarantee the quality standardized testing of parts and prototypes are applied. However, results of accelerating corrosion tests differ from corrosion data of field components. Additionally, results of corrosion issues in a late stage of the development process are difficult to handle.

Due to common problems it is necessary to detect stone chipping areas in an early stage of development due to a computerized simulation of stone chipping. The following work aims to create a model of stone adhesion, stone launching, stone trajectories, stone impact and the corrosion progress starting from the stone chipping defect. Additionally, a non-destructive measurement of stone chipping damages and the corrosion propagation should be developed.

To analyze specific stone trajectories while driving high speed cameras were used. Results show the mechanism of stone launching due to the tire which describes the starting conditions. The impact of stones at automobile parts in special the coefficient of restitution was measured using high speed cameras.

Induced damages of the coating system and the corrosion propagation were analyzed using Pulsed-Phase-Thermography. After analyzing results were correlated and verified with destructive analyzes.

Information of the corrosion depth and the material removal behavior of automotive parts were created using destructive measurements. Results of measurements were correlated with site-specific environmental influencing factors of the corrosion. Correlating the data an empirical model of the material removal of dynamic corrosion loaded parts was created. The fundament of the empirical model was an existing static dose-response-function.

The conclusion is a working model for simulating the stone chipping load of cars. It enables a detection of exposed stone chipping areas in an early stage of development. Additionally, the work shows a threshold of the corrosion propagation of a stone chipping defect over years of car usage of polymer coated steel. Results show a much weaker material removal at stone chipping areas in compare to constantly humid parts or welds.

**Teilergebnisse dieser Arbeit wurden bereits vorab veröffentlicht und auf Tagungen als Poster oder Vortrag präsentiert:**

### **Publikationen**

**Schönberger A.**, Pohl E., Förg M., Grün N., Giese V., Virtanen S., Stone chipping physics: the adhesion of stones on tires, the trajectories and the rebound of stones from automobile parts, International Journal of Automotive Technology, Paper No. 220110314 (In Revision)

**Schönberger A.**, Virtanen S., Giese V., Spießberger C., Schröttner H., Rattenberger J., Wagner J. (2011), Non-destructive evaluation of stone-impact damages using Pulsed Phase Thermography, Corrosion Science, Corrosion Science, Volume 56, März 2012, Seiten 168-175

**Schönberger A.**, Giese V., Virtanen S. (2011), Pulsed Phase Thermography of Corrosion and Stone Chipping Damages, 18<sup>th</sup> International Corrosion Congress Paper 258

**Schönberger A.**, Simulation des Steinschlags und Prognose der induzierten Korrosion. Von den Grundlagen zum Modell, Tagungsbandbeitrag Promotion 2011, BMW AG, München, Deutschland

**Schönberger A.**, Virtanen S., Giese V., Schröttner H., Spießberger C. (2010), Non-destructive detection of corrosion applied to steel and galvanized steel coated with organic paints by the Pulsed Phase Thermography. Materials and Corrosion, Volume 63, Issue 3, März 2012, Seite 195-199

Grün N., **Schönberger A.**, Schulz M. (2010), From Soiling to Stone Chipping – Simulation of Particle Trajectories and Impact in Time Averaged and Transient Flow Fields around Vehicles. Word Automotive Congress FISITA 2010, F2010-C-098

### **Vorträge:**

Pulsed Phase Thermography of Corrosion and Stone Chipping Damages, 18<sup>th</sup> International Corrosion Congress Paper 258, Perth 2011, Australia (Nov. 2011)

Puls Phasen Thermographie von Steinschlagbeschädigungen und Korrosion, Fachkolloquium „Mikro- und Nanoanalytik, Zentrum für Elektronenmikroskopie, Technische Universität Graz, Graz, Österreich, 2011

Simulation des Steinschlags und Prognose der induzierten Korrosion. Von den Grundlagen zum Modell, Promotion 2010, BMW AG, München, Deutschland

Prognose des Steinschlags und der induzierten Korrosion am Fahrzeug, Fachkolloquium „Mikro- und Nanoanalytik“, Zentrum für Elektronenmikroskopie, Technische Universität Graz, Graz, Österreich, 2010

### **Poster:**

Steinschlaginduzierte Korrosion – Simulation und Prognose, Promotion 2011, BMW AG, München, Deutschland

Steinschlag und Korrosion – Prognose des Korrosionsverhaltens, Promotion 2010, BMW AG, München, Deutschland

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Aktueller Kenntnisstand	2
1.2	Zielsetzung der Arbeit	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen der Fahrzeugtechnik	5
2.1.1	Dynamik von Fahrzeugen	5
2.1.2	Physik des Reifens	7
2.2	Aufnahmemechanismus	9
2.2.1	Adhäsionskräfte	10
2.2.2	Kapillarkräfte	12
2.2.3	Kontaktmechanik	13
2.3	Abwurf- und Flugmechanik	16
2.3.1	Kinematik der Steinmitnahme	17
2.3.2	Dynamik der Steinmitnahme	18
2.3.3	Kinematik des Steinfluges	20
2.4	Stoßphysik des Aufpralls / Resitutionskoeffizient	21
2.5	Beschichtungssysteme	22
2.5.1	Konversionsschicht	23
2.5.2	Kathodische Tauchlackierung (KTL)	24
2.5.3	Pulverbeschichtung	25
2.5.4	Multischichtsystem	26
2.5.5	Steinschlagschutzsysteme	27
2.6	Steinschlaginduzierte Beschädigungen	28
2.7	Korrosionsfortschritt nach Beschädigung	31
2.7.1	Delamination von Polymerbeschichtungen	31
2.7.2	Korrosionsmechanismus	34
2.7.2.1	Eisen	34
2.7.2.2	Zink	36
2.7.3	Korrosionsfaktoren	37
2.7.3.1	Feuchtigkeit / Spritzwasser	37
2.7.3.2	Salze	38

---

2.7.3.3	Temperatur	41
2.7.3.4	pH-Wert	43
2.7.3.5	Sauerstoffgehalt	44
2.7.3.6	Weitere Umwelteinflussfaktoren	45
2.7.4	Empirische Materialabtragsmodelle	48
2.7.5	Spezifische Anforderungen steinschlaggefährdeter Bereiche	52
2.8	Theorie zur thermographischen Detektion von Steinschlag- schädigungen und Korrosion	52
2.9	Weiteres Vorgehen durch fehlenden Stand der Technik	56
<b>3</b>	<b>Experimentelles</b>	<b>57</b>
3.1	Analyse des Steinbewurfs von Fahrzeugen	57
3.1.1	Flugbahnanalysen mit einem ortsfesten Kamerasystem	58
3.1.2	Flugbahnanalysen mit einem fahrzeugfesten Kamerasystem	60
3.1.3	Steinschlaganalyse an der Hinterachse	61
3.2	Laboruntersuchung des Restitutionskoeffizienten	63
3.3	Analyse von Beschädigungen und induzierte Korrosion mittels Puls-Phasen-Thermographie	66
3.3.1	Proben	66
3.3.2	Steinschlag- und Korrosionsprüfungen	67
3.3.3	Analysemethoden	67
3.4	Untersuchung des Korrosionsfortschrittes	70
3.4.1	Laboruntersuchung des Korrosionsfortschrittes	70
3.4.2	Untersuchungen des Korrosionsfortschrittes von Fahrwerks- komponenten	71
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>72</b>
4.1	Steinbewurf von Fahrzeugen	72
4.1.1	Steinkinematik unter trockenen Fahrbahnbedingungen	73
4.1.1.1	Abwurfkinematik an nicht angetriebenen Rädern (xz-Achse)	73
4.1.1.2	Abwurfkinematik an angetriebenen Rädern (xz-Achse)	77
4.1.1.3	Laterale Abwurfkinematik von Steinen (xy-Achse)	78
4.1.1.4	Abwurfkinematik von Steinen bei gleitenden Reifen (xy-Achse)	79



---

4.1.1.5	Abwurfkinematik von Steinen bei durchdrehenden Reifen (xy-Achse)	80
4.1.2	Steinbewurf unter nassen Fahrbahnbedingungen	80
4.1.3	Steinschlaghäufigkeit und -intensität an der Hinterachse	81
4.2	Stoßphysik von Projektilen auf ausgewählten Materialien	87
4.2.1	Flachnadelvlies (PES/PP) der Radhausschale	87
4.2.2	Kunststoff (PP EPDM) der Radhausschale	88
4.2.3	Unlegiertes Stahlblech von Fahrwerkskomponenten	90
4.2.4	Asphalt	91
4.2.5	Gummimischung eines Reifens	93
4.3	Analyse von Steinschlagbeschädigungen und induzierter Korrosion mittels Puls-Phasen-Thermographie	94
4.3.1	Intakte Beschichtung	94
4.3.2	Defekte an Monoschichtsystemen	96
4.3.3	Defekte an Multischichtsystemen auf unterschiedlichen Substraten	99
4.3.3.1	Multischichten auf Aluminiumsubstraten	99
4.3.3.2	Multischichten auf Stahlsubstraten	106
4.3.3.3	Multischichten auf Polypropylensubstraten	107
4.3.4	Korrosionsfortschritt an Mono- und Duplexschichtsystemen	109
4.4	Korrosionsfortschritt von Proben in Korrosionswechselltests	113
4.4.1	Unlegierter Stahl mit KTL-Beschichtung	114
4.4.2	Verzinkter Stahl mit KTL-Beschichtung	118
4.5	Korrosionsfortschritt an Komponenten von Fahrzeugen aus unterschiedlichen Regionen	124
4.5.1	Materialabtragsraten von Fahrwerkskomponenten	124
4.5.2	Umweltdaten der unterschiedlichen Regionen	128
4.5.3	Korrelation des Materialabtrages mit den Umwelteinflussgrößen	130
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>140</b>



## 1 Einleitung

Automobile sind qualitativ und technisch hochwertige Produkte, wobei die optische Wahrnehmung des äußeren Erscheinungsbilds eines Fahrzeuges ein wichtiges Kriterium für Kunden darstellt. Um das Erscheinungsbild möglichst lange zu erhalten und die Fahrzeuge vor den vielfältigen Belastungen im Straßenverkehr zu schützen, werden Korrosionsschutzschichten auf Karosserie- und Montagebauteile aufgebracht. Sie dienen dem Schutz des Substrates vor Korrosion und sollen die Korrosionsfreiheit von Fahrzeugteilen sicherstellen und diese garantieren.

Ein Problem besteht bei mechanischen Beschädigungen, die unter anderem durch Steinschlag hervorgerufen werden. Vom Winterdienst gesplittete Fahrbahnen spielen hierbei die größte Gefahrenquelle, durch den Aufprall von Steinen, die optisch und akustisch vom Fahrer kaum wahrgenommen werden. Diese werden zu einem hohen Anteil vom eigenen Vorderrad aufgenommen und abgeworfen. Hierbei können kosmetische oder sogar korrosionsinduzierende Schäden durch Schichtverletzungen hervorgerufen werden. Eine Beschädigung der Polymer-Substrat-Grenzfläche führt bei einer Beteiligung eines Elektrolyten zu Delamination der Beschichtung, Korrosionsfortschritt, Blasenbildung und Materialabtrag. Daraus begründet sich auch das Interesse der Automobilhersteller optimale Steinschlagschutzsysteme zu applizieren, die unter anderem aus Kunststoffabdeckungen, PVC oder Polyurethanfolien bestehen und mit aufwändigen Versuchen an fahrbaren Prototypen entwickelt werden. Zusätzlich können bei Versuchsauswertungen auch gefährdete Steinschlagbereiche ermittelt werden. Diese Korrosionsabsicherung wird durch die benötigten Hardware-Komponenten erst spät im Entwicklungszyklus durchgeführt und ist dadurch sehr kostenintensiv.

Von daher ist das Ziel, gefährdete Steinschlagbereiche an Karosserie- und Montagebauteilen in der frühen Entwicklungsphase zu definieren, ihren Beschädigungsgrad zu bestimmen und geeignete Schutzmaßnahmen einzuleiten. Dies kann aber nur durch eine computerbasierte Simulation des Steinbewurfs von Fahrzeugen ermöglicht werden. Fehlende Kenntnisse von Anfangs- und Stoßparametern lassen dies aber nicht realisieren. Auch die während eines Steinaufpralls auftretenden Mechanismen beeinflussen die Beschädigungsart und -grad von Beschichtungen.

Hersteller von Beschichtungssystemen haben hierzu Beschädigungsmechanismen durch Steinschlag erarbeitet sowie Prüf- und Analysemethoden optimiert. Jedoch

bestehen aktuelle Methoden zur Bewertung der Steinschlagbeschädigung aus sehr zeitintensiven elektrochemischen Untersuchungen oder ungenauen visuellen Oberflächenbewertungen. Hierbei gibt es zahlreiche Veröffentlichungen von Analysen der Steinschlagbeständigkeit von Beschichtungssystemen, die teilweise unterschiedliche Ergebnisse liefern. Häufig sind die Erkenntnisse nur auf bestimmte Beschichtungssysteme einzelner Firmen bezogen. Das Ziel ist es, die reale Belastung der Komponenten, wie sie im Fahrbetrieb auftreten, abzuprüfen. Auch der Korrosionsfortschritt von dynamisch belasteten Komponenten ist weitestgehend nicht bekannt. Vergleichende Untersuchungen von Feldfahrzeugen haben ebenfalls gezeigt, dass die Steinschlag- und Korrosionsbelastung in verschiedenen Ländern unterschiedliche Ergebnisse gebracht haben und die Ergebnisse gegenüber Laborversuchen stark abweichen können.

### 1.1 Aktueller Kenntnisstand

Zur Steinmitnahme durch Reifen liegt eine Forschungsarbeit der Universität Dayton vor, in der der Abwurf von Steinen an Flugzeugreifen untersucht wurde [1]. Diese Ergebnisse lassen sich nicht direkt auf Kraftfahrzeuge übertragen, da die Parameter der Reifen und der Gewichtskraft stark abweichen.

Beim Aufprall von Körpern auf Materialien gibt es zahlreiche Veröffentlichungen zu Beschädigungen an Beschichtungssystemen [2-11] und Analysen des Stoßprozesses mit der Beschreibung des Restitutionskoeffizienten [12, 13]. Diese Erkenntnisse sind aber auf spezifische Eigenschaften von Beschichtungssystemen und definierte Materialpaarungen beschränkt, die sich nicht ohne weiteres auf die hiesige Problemstellung übertragen lassen.

Der Korrosionsfortschritt unterschiedlicher Materialien mit zahlreichen Beschichtungssystemen wurde bereits weitreichend in statischen Prüfungen analysiert [14, 15] und deren Korrosionsvorgänge unter Verwendung elektrochemischer Messmethoden beschrieben [16-19]. Diese Beiträge liefern jedoch keine Aussagen über dynamische Korrosionsbelastungen und deren Materialabtrag im realen Fahrzeuggebrauch. Auch die zeitaufwändigen Messmethoden eignen sich nicht für einen industriellen Einsatz.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

- Es wird ein Einblick in die Adhäsionsarten von Splitt an Gummireifen und den Einfluss unterschiedlicher Umweltbedingungen gegeben.
- Aufgrund benötigter Abwurf- und Stoßparameter für eine Steinschlagsimulation werden Mitnahmewinkel und der Aufprall von Steinen an Gummireifen in Fahr- und Laborversuchen analysiert und Mechanismen erarbeitet.
- Um die reale Belastungsintensität zu bestimmen, werden zusätzlich Untersuchungen der Steinschlagdichte und -intensität an Hinterachskomponenten durchgeführt um ein Modell der Steinschlagbelastung aufzustellen.
- Zur schnellen Bewertung von Steinschlagbeschädigungen und des Korrosionsfortschritts soll eine neue Analysemethode erarbeitet werden, die industriell genutzt werden kann. Hierbei sollen theoretische Modelle aufgestellt und mit empirischen Daten verifiziert werden.
- Materialabtragsmessungen von Komponenten aus Fahrzeugen sollen einen Einblick in den Korrosionsfortschritt nach einer Steinschlagbeschädigung unter realen Nutzungsbedingungen darstellen und eine Prognose des Materialabtrags ermöglichen. Hierbei soll ein Prognosemodell des Korrosionsfortschritts durch empirische Daten aufgestellt werden.

## 2 Theoretische Grundlagen

Fahrzeuge sind vielfältigen umweltbedingten und fahrspezifischen Belastungen ausgesetzt. Umweltspezifische Belastungen können natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein. Natürliche Belastungen wie Niederschlag, Luftfeuchtigkeit und Temperatur werden vor allem durch das Klima definiert. Zu den anthropogenen Belastungen zählt unter anderem das Streuen von Splittgut und Chloriden auf Straßen, das bei Fahrzeugen mechanische Beschädigungen hervorrufen kann und im weiteren Verlauf durch das Einwirken eines chloridhaltigen Elektrolyten zu Korrosion führt.

Diese Belastungen werden in der Automobilbranche mit Multisteinschlagtests [20] und Korrosionsprüfungen [21, 22] sowie mit firmenspezifischen dynamischen Korrosionstests nachgestellt. Um aber frühzeitig durch Steinschlag gefährdete Bereiche an Fahrzeugen zu definieren, ist eine computerbasierte Simulation notwendig. Eine bestehende numerische, strömungsmechanische (Computational Fluid Dynamics (CFD)) Simulation der Verschmutzung durch Staubpartikel soll dazu auf eine Steinschlagsimulation erweitert werden [23-26].

In der Arbeit wird der Eigenbewurf von Fahrzeugen durch das Vorderrad beschrieben. Der durch vorausfahrende Fahrzeuge verursachte Fremdbewurf von Fahrzeugen wird nicht untersucht. Dieser ist charakterisiert durch eine geringe Aufprallwahrscheinlichkeit, die jedoch hohe Geschwindigkeiten hat.

Um ein Modell des Steinbewurfs von Fahrzeugen aufzustellen, müssen geometrische und dynamische Zusammenhänge des Gesamtfahrzeuges und des Reifens berücksichtigt werden, um anschließend den Aufnahmemechanismus von Steinen durch Wechselwirkungen mit dem Reifen zu beschreiben. Haftende Steine werden nach der Aufnahme in einer zyklischen Bahnkurve bewegt, bis die Zentrifugalkräfte die Adhäsionskräfte übersteigen. An diesem Punkt wird der Stein vom Reifen abgeworfen und nimmt eine charakteristische Flugbahn eines „schiefen Wurfs“ ein. Liegt diese Flugbahn auf einem Kollisionskurs mit Fahrzeugkomponenten, kommt es zu einem Stoßvorgang, bei dem Energie zwischen den beiden Stoßpartnern übertragen wird und Beschädigungen in Beschichtungssystemen hervorgerufen werden können. Wirkt anschließend ein Elektrolyt an den Beschädigungen, können elektrochemische Reaktionen einsetzen, die zu einer fortschreitenden Delamination der Polymerbeschichtung führen. Diese Reaktionen führen zusätzlich zu Korrosion und zu einem Abtrag des Materials unter Einfluss umweltspezifischer Parameter, die diesen Pro-

zess und die Korrosionsgeschwindigkeit leiten. Im Folgenden wird dieser Prozess von der Steinaufnahme bis zum Materialabtrag in chronologischer Abfolge beschrieben.

## 2.1 Grundlagen der Fahrzeugtechnik

Ein Kraftfahrzeug ist ein System mit vielen Freiheitsgraden, das durch innere und äußere Kräfte zu Bewegungen angeregt wird. Um diese Kräfte und Bewegungen vereinfacht darzustellen, werden diese an einem Längsdynamik- und einem Einspurmodell eines Fahrzeuges beschrieben.

### 2.1.1 Dynamik von Fahrzeugen

Fahrzeuge können kinetische Energie durch Kraftübertragung zwischen Reifen und Straße erzeugen. Bei einer störungsfreien Geradeausfahrt während des Anfahrens oder Bremsens können die auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte mit einem Längsdynamikmodell (Abb. 1) beschrieben werden.

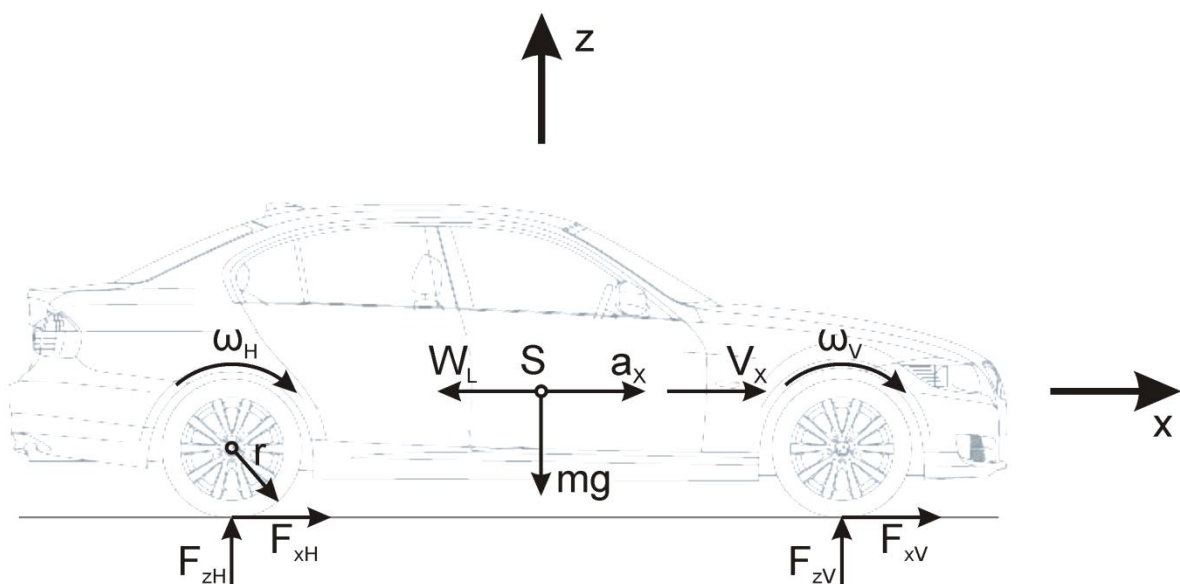


Abb. 1 Längsdynamik-Modell eines Fahrzeuges bei einer Geradeausfahrt

Das Fahrzeug erfährt hierbei Kräfte durch sein Eigengewicht, seinen Antrieb und den Luftwiderstand. Die Aufstandskräfte ( $F_{zH}$ ,  $F_{zV}$ ) sind von dem Fahrzeugeigengewicht ( $mg$ ) und der Gewichtsverteilung (abhängig vom Schwerpunkt  $S$ ) des Fahrzeuges abhängig. Die horizontalen Kräfte ( $F_{xH}$ ,  $F_{xV}$ ) der Aufstandsfläche werden durch be-

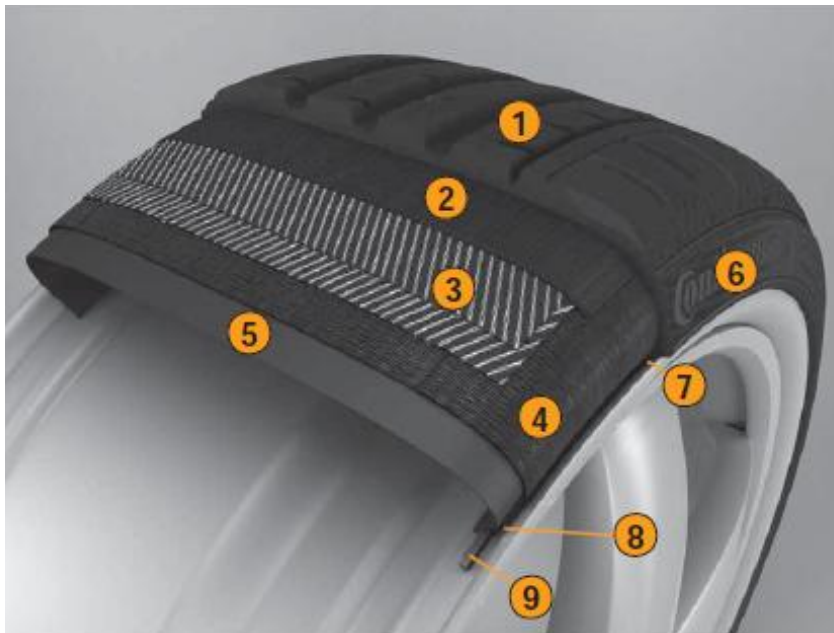




Diese Kräfte werden durch Wechselwirkungen zwischen dem Reifen und der Fahrbahn erzeugt. Eine Kraftübertragung wird erst durch die spezifische Eigenschaft der Gummierung des Reifens ermöglicht, die für die Adhäsions- und Reibkräfte mit der Fahrbahn verantwortlich ist. Durch diese Kräfte können auch Steine an der Reifenlauffläche aufgenommen werden.

### 2.1.2 Physik des Reifens

Reifen sind hochwertige, konstruktive Bauteile des Fahrwerks und müssen Kräfte in Längs- und Querrichtung übertragen können. Heutzutage werden moderne Radialreifen aus einem Laufband und einer Karkasse eingesetzt (Abb. 3).



**Abb. 3 Radialreifen eines PKW [29]**

Das Laufband des Radialreifens besteht aus einem Laufstreifen (1), der für die Straßenhaftung verantwortlich ist, aus Spulbandagen (2), die hohe Geschwindigkeiten ermöglichen und aus Stahlcord-Gürtellagen (3), die die Fahrstabilität und den Rollwiderstand optimieren.

Die Karkasse besteht aus Textilcordeinlagen (4), die den Reifen in Form halten, aus einer Innenschicht (5), die den Reifen luftdicht macht, aus einem Seitenstreifen (6), der vor äußeren Beschädigungen schützt, aus einem Wulstverstärker (7), der die Fahrstabilität unterstützt und präzises Lenkverhalten ermöglicht, aus Kernprofilen (8),

die die Fahrstabilität, das Lenk- und Komfortverhalten begünstigen und aus einem Stahlkern (9), der den festen Sitz auf der Felge garantiert [29].

Für die Adhäsion von Steinen an Reifen ist vor allem der Laufstreifen verantwortlich. Hierbei spielt nicht nur die geometrische Form des Reifens, sondern auch die Zusammensetzung der Gummimischung eine große Rolle. Bei Autoreifen werden verschiedene Bestandteile in unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt, um bestmögliche Eigenschaften des Reifens zu generieren. Diese Bestandteile weisen bei Sommer- und Winterreifen unterschiedliche Konzentrationen auf. Sie bestehen vor allem aus Kautschuk [29-31], Weichmachern (z.B. Öle, Harze) [32-34], Füllstoffen (z.B. Ruß, Silica, Kohlenstoff, Kreide) [35,36], Festigkeitsträgern (Stahl, Polyester, Rayon, Nylon), Chemikalien für die Vulkanisation (unter anderem Schwefel, Zinkoxid) [37-40] und Alterungsschutzmitteln wie Antioxidans und Antiozonans [29].

Durch eine Änderung der Zusammensetzung können die Eigenschaften eines Reifens beeinflusst werden. Gummimischungen von Sommerreifen werden so ausgelegt, dass diese bei hohen Temperaturen nicht zu weich werden. Hingegen sind Winterreifen für niedrige Temperaturen ausgelegt, damit die Gummimischung elastisch bleibt. In Abbildung 4 ist dazu der Einfluss der Temperatur auf den statischen Elastizitätsmodul zu sehen, der durch die Gummimischung verändert werden kann [41].

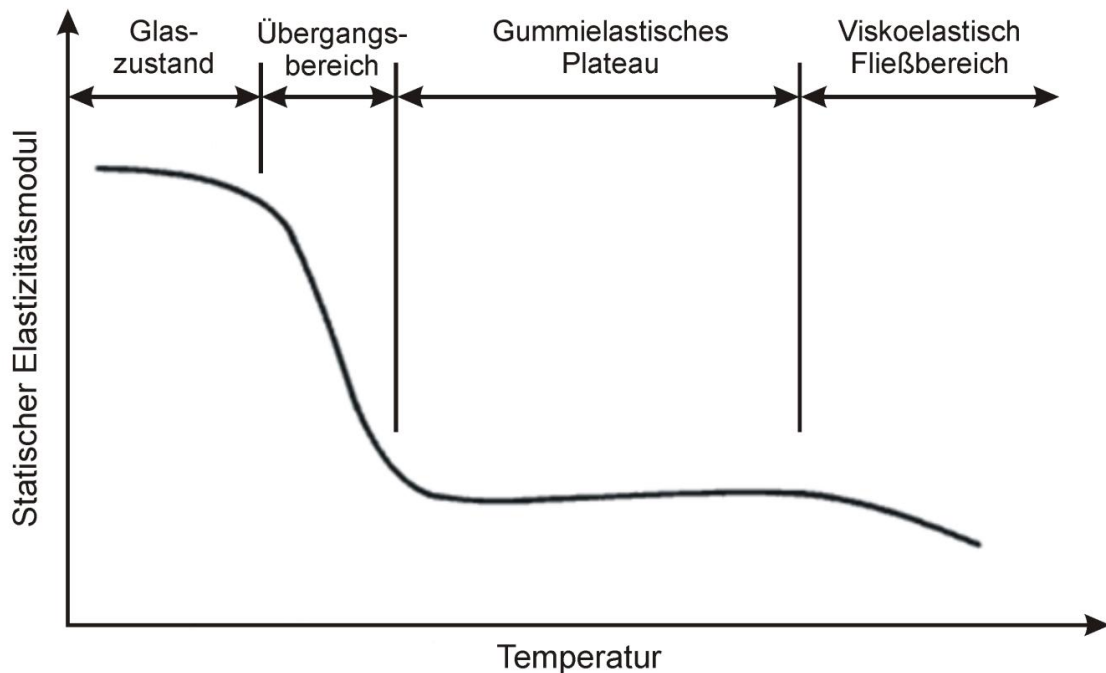


Abb. 4 Einfluss der Temperatur auf den statischen Elastizitätsmodul von Gummi

Jedoch wird nicht nur die Gummimischung der Reifen für den Einsatz im Winter variiert, sondern auch die Lauffläche wird diesen Verhältnissen angepasst. Bei Winterreifen ist vor allem das Profil ein wichtiger Faktor, das mit Lamellen für eine verbesserte Verzahnung mit dem Schnee ausgestattet ist. Zusätzlich werden Lauffläche und Profilblöcke mit Rillen und Einschnitten versehen. Ein weiterer Nutzen des Profils ist die Ableitung des Wassers zwischen Reifen und Fahrbahn, um bessere Haftung zu gewährleisten. Der Reifen weist in der Mitte meist eine Längsprofilierung auf, wobei in den äußeren Bereichen die Querprofilierung vorherrscht [41].

Diese Profile, Lamellen, Rillen und Einschnitte erzeugen nicht nur eine bessere Verzahnung des Reifens, sondern können Partikel von der Fahrbahn aufnehmen und diese verklemmen. Vor allem durch den Winterdienst gestreute Splittsteine werden durch Adhäsionsmechanismen von der Reifenlauffläche mitgenommen. Im nächsten Kapitel wird auf die Aufnahmemechanismen von Splittsteinen näher eingegangen.

## 2.2 Aufnahmemechanismus

Adhäsion und Kontaktmechanik sind die Grundlagen zur Beschreibung von Haftvorgängen zwischen zwei Kontaktpartnern. Durch diese Mechanismen kann eine Wechselwirkung zwischen einem Stein und einer Lauffläche eines Gummireifens dargestellt werden. Die Adhäsion beschreibt hierbei die Bindungskraft der beiden Partner, die an Berührungspunkten entstehen, die durch die Kontaktmechanik beschrieben werden können.

Adhäsion ist jedoch ein Begriff, der nicht streng definiert ist und unterschiedlich angewendet wird, da diese Kraft nicht vollständig erforscht ist. Darum wird im Folgenden die im Rahmen dieser Arbeit bevorzugte Definition beschrieben:

„Unter Adhäsion versteht man die Wechselwirkung eines festen Körpers mit größeren Partikeln oder kompakten flüssigen Phase, die zu einer Haftung der Partikel oder Phasen an der festen Oberfläche führt.“ [42]

Diese Definition lässt erkennen, dass es sich um ein weites Forschungsfeld handelt und unterschiedlichste Adhäsionsmechanismen daran beteiligt sind, da Haftung durch komplizierte Wechselwirkungen zwischen kontaktierenden Oberflächen hervorgerufen wird.

Bei der Adhäsion kann grundsätzlich zwischen mechanischer und spezifischer Adhäsion unterschieden werden. Die mechanische Adhäsion beschreibt die Wechselwir-

kung zwischen zwei Kontaktpartnern durch eine Verklammerung der rauen Oberflächen. Hingegen beschreibt die spezifische Adhäsion eine von der Geometrie unabhängige Wechselwirkung zweier Kontaktpartner durch Hauptvalenz- und Nebenvalenzbindungen. Die Nebenvalenzbindungen können aus Dipol-Wechselwirkung, Wasserstoffbrücken oder Dispersionskräften bestehen. Hauptvalenzbindungen beschreiben hingegen stark ausgeprägte Metall-, Atom und Ionenbindungen.

Im Fall eines starren rauen Körpers (Stein) in Kontakt mit einem viskosen Material (Gummi), müssen mechanische und spezifische Adhäsionskräfte berücksichtigt werden. Diese Kräfte wirken jedoch nur an wahren Kontaktflächen, was eine kontaktmechanische Betrachtung des Problems unerlässlich macht. Zusätzlich können äußere Umwelteinflüsse die Kontaktbedingungen verändern. Hierbei kann Temperatur die Materialeigenschaften der Partner ändern, was zu einer stärkeren geometrischen Anpassung der beiden Körper führen kann. Durch eine beteiligte Flüssigkeit, die beide kontaktierenden Oberflächen benetzt, können zusätzlich starke Kapillarkräfte aufgebaut werden.

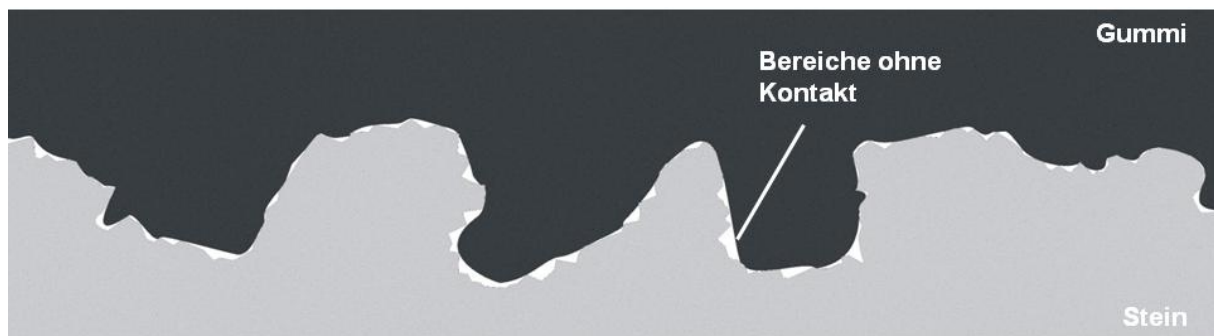
Im Folgenden werden die auftretenden Adhäsionskräfte beschrieben und der Kontakt zwischen einer rauen Stein- und einer elastischen Gummioberfläche analysiert.

### 2.2.1 Adhäsionskräfte

Adhäsion beschreibt die Wechselwirkung zweier sich annähernder Oberflächen. Bei einer vollkommen glatten Oberfläche entspricht die Kontaktfläche der geometrischen Abmessung des Kontaktes. Hierbei kann die Adhäsionskraft direkt mit der Kontaktfläche korreliert werden. Jedoch ist durch die raue Struktur einer Steinoberfläche die wahre Berührungsfläche zu Kontaktpartnern viel geringer. Doch kann sich ein viskoelastischer Körper, wie die Gummierung des Reifens an die Rauigkeit anpassen und so die wahre Kontaktfläche vergrößern. Darum spielt die Adhäsion bei der Gummireibung eine wesentliche Rolle [43].

Durch diese Eigenschaften können mechanische und spezifische Adhäsionskräfte aufgebaut werden, die den Zusammenhalt zweier Oberflächen darstellen. Die mechanische Adhäsion beschreibt eine formschlüssige Verbindung zwischen einer Phase und einer Oberfläche. Die Haftung basiert hier im Wesentlichen auf dem Fließen eines viskosen Materials in Poren, Kapillaren und Hinterschneidungen einer zweiten Oberfläche, um eine formschlüssige Verbindung zu bilden. Dieser Mecha-

nismus wird hauptsächlich beim Verkleben rauer Oberflächen genutzt, damit die Haftkräfte verstärkt werden. Jedoch kann mit diesem Mechanismus auch das Fließen des viskoelastischen Gummis in Rauigkeiten des Steins beschrieben werden (Abb. 5), wodurch kurzzeitig eine formschlüssige Verbindung aufgebaut wird, die aber durch die elastische Rückverformung schnell aufgelöst wird. Bei dem Rückverformen des elastischen Materials entstehen Reibkräfte an den Rändern der Poren, die für die resultierende Haftkraft verantwortlich sein werden. Darum ist diese Art der Adhäsion im oben beschriebenen Beispiel auf Reibschluss zurückzuführen.



**Abb. 5** Verformung eines viskosen Materials, um Rauigkeiten auszugleichen

An den wahren Kontaktstellen, die durch die Anpassung des viskosen Materials an raue Oberfläche entstehen, treten spezifische Adhäsionskräfte, in diesem Fall „Van-der-Waals“-Kräfte, auf.

Der physikalische Hintergrund dieser Kraft ist auf elektrisch neutrale Atome zurückzuführen, die in einem geringen Abstand durch Ladungsverschiebung Van-der-Waals-Kräfte erzeugen und mit zunehmender Distanz schnell abschwächen. Dabei entstehen Wechselwirkungen zwischen den beiden Oberflächen die durch das Aufbringen einer Energie  $E_{adh}$  wieder gelöst werden können.

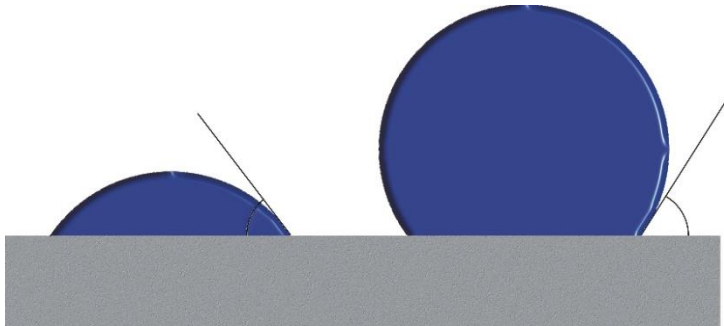
$$E_{adh} = 2 \cdot \gamma \cdot A \quad (1)$$

Diese Energie wird bestimmt durch die Oberflächenenergie  $\gamma$  und die wahre Kontaktfläche  $A$ .

### 2.2.2 Kapillarkräfte

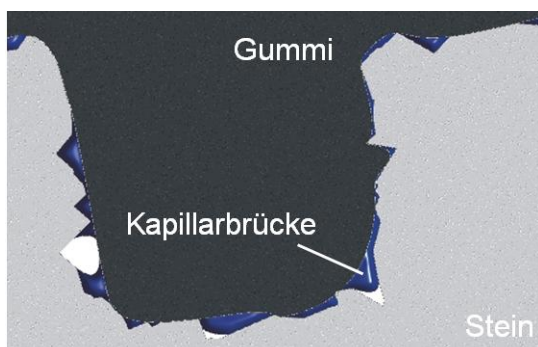
Adhäsion kann jedoch stark von Umweltbedingungen beeinflusst werden. Hier ist vor allem Feuchtigkeit ein wichtiger Faktor, der verstärkt Haftmechanismen durch Kapillarkräfte hervorrufen kann.

Kapillarkräfte müssen bei einer Wechselwirkung zweier Körper berücksichtigt werden, wenn zusätzlich eine Flüssigkeit die beiden Oberflächen der Kontaktpartner benetzt. Die entstehende Bindungskraft ist charakterisiert durch die Oberflächenenergie der Flüssigkeit und den Kontaktwinkel, der sich bei der Benetzung ausbildet. Der Kontaktwinkel  $\Theta$  beschreibt die Benetzung der Oberfläche (Abb. 6). Winkel unter  $90^\circ$  zeichnen eine Benetzung der Oberfläche aus, was durch stärker ausgeprägte Adhäsionskräfte gegenüber Kohäsionskräften erzeugt wird.



**Abb. 6 Kontaktwinkel zwischen einer Flüssigkeit und einer Oberfläche**

Befindet sich jedoch eine Flüssigkeit zwischen zwei Körpern, bildet sich ein charakteristischer Krümmungsradius der Flüssigkeit zwischen den beiden Oberflächen aus. Ist dieser Krümmungsradius negativ, werden die Oberflächen der beiden Partner benetzt und es entsteht ein Unterdruck in der Flüssigkeit, der zur Kapillarkraft führt (Abb. 7) [43].



**Abb. 7 Ausbildung von Kapillarbrücken zwischen Gummi und Stein**

Diese Kraft kann durch den Unterdruck, der auf die vollständig benetzten Bereiche zwischen einer Kugel und einer Ebene wirkt, durch folgende Formel beschrieben werden [44]:

$$F = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma \quad (2)$$

Die benötigte Kraft um beide Partner zu trennen, wird durch den Kugelradius  $R$  und die Oberflächenspannung  $\gamma$  beschrieben. Weiterführende Arbeiten beschreiben beschäftigen die Adhäsionskraft von rauen Oberflächen von Kontaktkörpern und viskosen Komponente [45, 46]. Es kann abgeleitet werden, dass Kapillarkräfte stärker ausgeprägt sind als Van-der-Waals-Kräfte und somit eine stärkere Bindungskraft auf Steine ausüben [47].

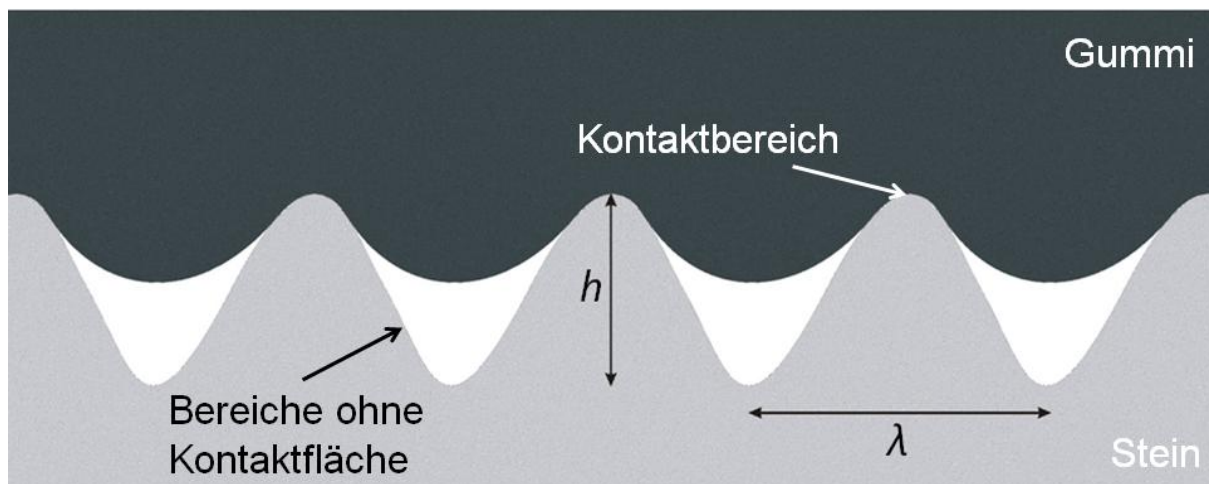
Zusätzlich wirkt die Kapillarität auch an nicht kontaktierenden Stellen der beiden Partner, hier können sich Kapillarbrücken bilden. Durch die Geometrie des Reifenprofils, sowie durch raue und unebene Steinoberflächen, können sich diese Bindungen verstärkend auswirken. Die unterschiedlichen Benetzungsgrade einer rauen Oberfläche beeinflussen hierbei die Stärke der Kapillarkräfte. Durch einen stärkeren Druck auf die Flüssigkeit kann diese tiefer in die Täler der Kapillaren eindringen und die Oberfläche stärker benetzen. Es kann sogar zu einer vollständigen Benetzung von Rauigkeiten kommen [43].

Treten Kapillarkräfte durch eine Füllung des Profils mit Wasser auf, kann eine Sogwirkung entstehen. Hierbei strebt die Flüssigkeit nach einer Maximierung ihre Oberfläche und benetzt Profilblöcke und Steine, wobei sich Kapillarkräfte ausbilden. Bei dem Aufbau einer Bindung über Kapillarkräfte ist die Korngröße des Steines eine wichtige Einflussgröße. Hierbei steigen die Kapillarkräfte mit der relativen Kontaktfläche, abhängig von der Korngröße, an [48].

### 2.2.3 Kontaktmechanik

Haftkräfte zwischen einem Stein und einem Reifen steigen mit zunehmender Kontaktfläche der beiden Körper an. Durch die raue Oberflächenbeschaffenheit eines Steines ist die wahre Kontaktfläche der beiden Partner um ein Vielfaches geringer als kalkulierte Werte, was unter der Annahme von selbstähnlichen fraktalen Oberflächen von Asphalt und von Steinen beschrieben wird. Bei einer fraktalen Oberflächenstruktur, wie es in der Natur häufig vorkommt, weisen Bereiche in einem theo-

retischen Modell ähnliche geometrische Eigenschaften auf (Abb. 8). Durch diese Annahme kann eine Berechnung der wahren Kontaktfläche  $A_w$  getroffen werden, die unter bestimmten Lasten  $F_N$  (Fahrzeuggewicht) auftreten. Einfache Modelle beschreiben hier die Struktur der Oberfläche mit einer Wellenlänge  $\lambda$  und einer Amplitude  $h$ .



**Abb. 8 Gummi wird gegen einen Körper mit Cosinus-Welle gedrückt**

Archard hat eine Theorie erarbeitet, die die wahre Kontaktfläche in Abhängigkeit der Normalkraft beschreibt. Er konnte einen proportionalen Zusammenhang der beiden Parameter ermitteln ( $A \sim F_N$ ) [48].

Weitere Arbeiten sprechen sogar von einer stärker als linear ansteigenden Kontaktfläche gegenüber der Normalkraft ( $A \sim F_N^{2/(1+H)}$ , mit  $H$  als der fraktalen Dimension) [49]. Persson weist die Annahmen dieser Arbeit zurück und hat ein Modell der Wechselwirkung zwischen Gummi und einer rauen Oberfläche (Asphalt) näher beschrieben. Dabei geht es um die Verformung der Gummierung eines Reifens, um Steinunebenheiten auszugleichen oder zu füllen. Der E-Modul  $E$  der Gummierung beeinflusst hierbei die elastische Energie, die im Gummi durch Verformung gespeichert wird ( $E_{el} = E \cdot \lambda \cdot h^2$ ). Ist diese elastische Energie schwächer als die erzeugte Adhäsionsenergie, die von der Veränderung der freien Oberflächenenergie ( $E_{ad} = \Delta\gamma \cdot \lambda^2$ ) abhängig ist und durch Van-der-Waals-Kräfte hervorgerufen wird, so formt der Gummi die Unebenheiten und Rauigkeiten weiter aus [50].

Diese Kräfte werden als spezifische Adhäsion bezeichnet und wirken nur an den tatsächlichen Kontaktpunkten zwischen Stein und Gummierung. Bei rauen Oberflächen



sind diese Kontaktpunkte relativ klein, und nur sehr geringe Kräfte können übertragen werden [51].

Durch den von Persson beschriebenen Mechanismus der Anpassung der Gummierung an Unebenheiten kann eine Erhöhung der Adhäsionskräfte beschrieben werden, die wohl durch eine kurzzeitige reibschlüssige Verbindung geprägt ist.

Persson betrachtet auch Materialeigenschaften, den Reifendruck und die Oberflächenbeschaffenheit beider Kontaktpartner [50].

Jedoch ist die Stärke der Adhäsionskraft zusätzlich von der Oberflächenbeschaffenheit und den umweltbedingten Einflussgrößen abhängig. Eine zusätzliche Temperaturerhöhung, die durch die elastische Verformung der Gummierung an den Kontaktpunkten durch Reibung und Arbeit hervorgerufen wird, steigert die adhäsive Wirkung durch eine Änderung der viskoelastischen Eigenschaften der Gummimischung [52].

Die Adhäsionskraft kann aber auch negativ durch Verschmutzungen von Oberflächen beeinflusst werden. Hierbei wird eine größere Distanz der beiden Kontaktpartner durch die Größe der Schmutzpartikel initiiert [50].

Selbst eine Benetzung der Oberflächen mit Fluiden, die zusätzliche Kapillarkräfte erzeugen, kann durch verschmutzte Bereiche beeinflusst werden. Zusätzlich zur Haftung an ebenen Oberflächen der Reifenlauffläche können Steine auch im Profil haften. Hierbei können Steine im Reifenprofil verklemmen, deren Abmaß größer als die Profilbreite ist (Abb. 9). Durch eine Druckkraft während des Überfahrens können diese in das Reifenprofil eindrückt werden. Die elastische Rückverformung des Profils, erzeugt eine Druckkraft  $F_N$  auf den verklemmten Stein, wobei eine Kombination aus einer reibschlüssigen und formschlüssigen Verbindung erzeugt wird. Die Ausprägung der Druckkraft, die auf den Stein ausgeübt wird, ist vor allem von den Normalkräften der sich zurückformenden Profilblöcke abhängig, die mit dem Steindurchmesser ansteigen.

Durch den Formschluss erzeugte Kräfte sind stark von der Steingröße und -geometrie abhängig. Hierbei verursachen scharfkantige Steine erhöhte Adhäsionskräfte durch einen Formschluss, wohingegen runde Steine einen größeren Reibschluss durch die größere Anlagefläche erfahren.

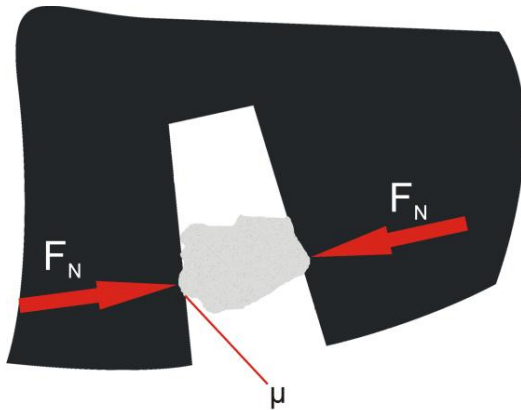


Abb. 9 Verkleben von Steinen im Profil

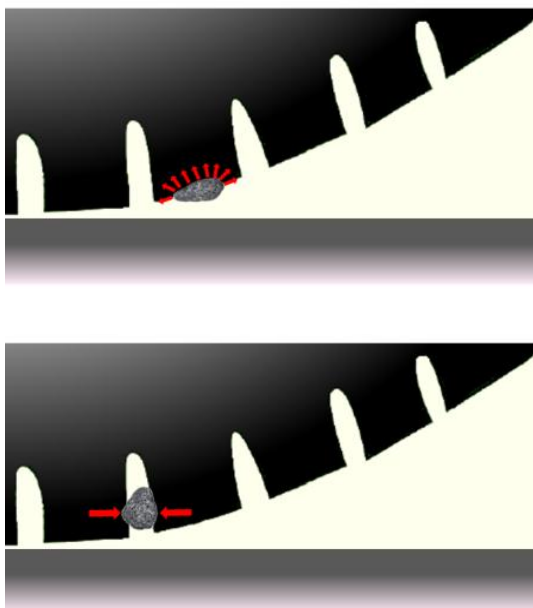
Bei einer reibschlüssigen Verbindung im Profil wird der Stein durch Reibkräfte an den Profilflächen (Abb. 9) mit dem Reibkoeffizient  $\mu$  verklemt.

$$F_{Adh} = F_N \cdot \mu \quad (3)$$

Verklebte Steine weisen durch unterschiedliche Korngrößen und Oberflächenstrukturen eine schwer zu definierende Klemmkraft auf. Wird diese Klemmkraft durch die Zentrifugalkraft überschritten, wird der Stein aus dem Profil herausgeschleudert.

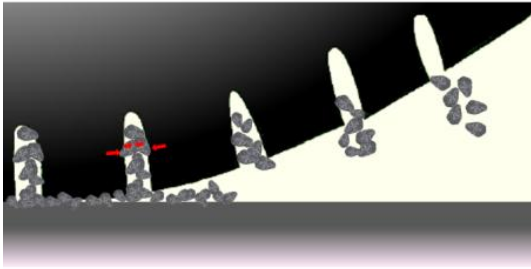
### 2.3 Abwurf- und Flugmechanik

Aus den im vorherigen Kapitel ermittelten Haftmechanismen eines Steines an der Gummierung können durch eine Betrachtung der Reifengeometrie folgende Transportphänomene von Steinen durch das Rad beschrieben werden:



- Adhäsion von Steinen an der Lauffläche des Reifens

- Verkleben von Steinen im Profil



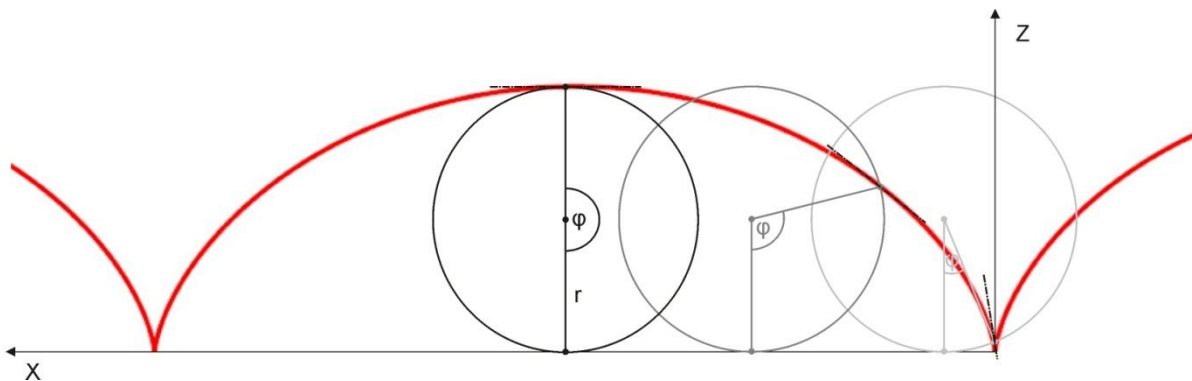
- Verklemmen von ineinander verhakten kleinen Steinen im Profil

**Abb. 10 Transportmechanismen von Steinen durch einen Reifen**

Diese Mechanismen bewirken unterschiedlich starke Bindungskräfte zwischen den Steinen und der Gummierung. Die von der Rotationsbewegung erzeugte Zentrifugalkraft kann die Haftkräfte von Steinen zur Gummierung übersteigen und dadurch die Haftverbindung lösen. Darum wird im Folgenden auf die Bahnkurve eines Punktes auf der Umlaufläche des Rades näher eingegangen.

### 2.3.1 Kinematik der Steinmitnahme

Ein Stein, der an der Oberfläche eines rollenden Reifens haftet, durchläuft die Bahnkurve einer Zykloide (Abb. 11). Diese zyklische Bahnkurve entsteht durch die Überlagerung einer Rotations- und Translationsbewegung eines rollenden Rades [53].



**Abb. 11 Zykloide Bahnkurve eines Punktes auf der Zylinderoberfläche**

Um die Zykloide zu beschreiben, ist es nötig, eine Bewegungsgleichung eines Punktes auf der Radlaufläche aufzustellen [54]. Als erstes wird die Koordinatenfunktion  $x(t)$  in Abhängigkeit des Rollwinkels  $\varphi$  und des Radius  $r$  für die Bewegung der Masse herangezogen.

$$x = \varphi \cdot r - \sin \varphi \cdot r \quad (4)$$

$$y = r - \cos \varphi \cdot r \quad (5)$$

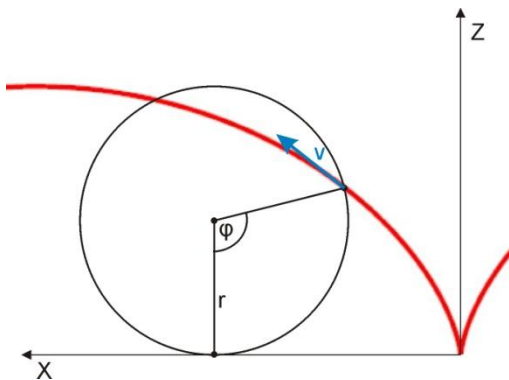
Um die Geschwindigkeit der Masse auf seiner Bahnkurve zu berechnen wird die Koordinatenfunktion differenziert.

$$\dot{x} = \dot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r \quad (6)$$

$$\dot{y} = \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r \quad (7)$$

Aus der Differenzierung der beiden Koordinatengeschwindigkeiten kann eine Gesamtgeschwindigkeit berechnet werden, die durch Umwandlung trigonometrischer Funktionen zu folgender Lösung führt:

$$v_{ges} = \dot{\varphi} \cdot r \cdot \begin{bmatrix} 1 - \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} = 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot r \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \begin{bmatrix} \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cos \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix} = 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot r \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (8)$$



**Abb. 12** Abwurfrichtung einer Masse von einem rotierenden Rad

Es zeigt sich, dass der Stein mit maximal doppelter Fahrzeuggeschwindigkeit bei einem Winkel von  $180^\circ$  abgeworfen wird. Die Richtung des Steinabwurfes ist hierbei immer tangential zur zykliden Bahnkurve, also immer positiv zur Fahrtrichtung gerichtet, mit Ausnahme des Momantanpols ( $\varphi = 0$ ), der sich an der Aufstandsfläche zwischen Reifen und Fahrbahn befindet (siehe Abb. 12).

### 2.3.2 Dynamik der Steinmitnahme

Um die auf einen Stein wirkende Zentrifugalkraft zu berechnen, müssen zuerst die horizontalen und vertikalen Kräfte ( $F_x, F_y$ ), die der Stein auf der Bahnkurve erfährt, berechnet werden.

$$F_x = m \cdot \ddot{x} \quad (9)$$

$$F_y = m \cdot \ddot{y} - m \cdot g \quad (10)$$

Die Beschleunigung auf der Bahnkurve kann durch eine weitere Differenzierung der Geschwindigkeiten (6) und (7) wie folgt berechnet werden:

$$\ddot{x} = \ddot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \cdot r \quad (11)$$

$$\ddot{y} = \ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi \cdot r \quad (12)$$

Um die Normal- und Tangentialkräfte der Masse zu berechnen, müssen mit Hilfe einer Transformationsmatrix  $A$  die Bahnkräfte  $(F_x, F_y)$  in Tangential- und Normalkräfte  $(F_T, F_N)$  des Rades transformiert werden.

$$A = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_N \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m \cdot (-\ddot{\varphi} \cdot r - \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \cdot r) \\ m \cdot (\ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi \cdot r) - m \cdot g \end{bmatrix} \quad (14)$$

Um die Fliehkraft zu berechnen, wird angenommen, dass es sich um ein ohne Schlupf abrollendes Rad handelt, das nicht beschleunigt ist. Somit wird die Beschleunigung des Rades  $\ddot{\varphi} = 0$  und die Geschwindigkeit  $\dot{\varphi} = \text{const.}$

$$\begin{bmatrix} F_T \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cdot m \cdot g \\ m \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot r - \cos \varphi \cdot m \cdot g \end{bmatrix} \quad (15)$$

Beim Abwurf eines Steines übersteigt die Fliehkraft  $F_N$  die Haftkraft des Steines und löst sich von der Oberfläche des Reifens. Beim Versagen der Verbindung wird der Kontakt nicht sofort vollständig gelöst, sondern ein Rissfortschritt an der Grenzfläche der Kontaktpartner führt zum Abbrechen der Adhäsionsverbindung. Dieser Rissfortschritt wird durch raue Oberflächen, Fehlstellen oder Schmutzpartikel begünstigt.

Die benötigte Energie, um einen Rissfortschritt zu erzeugen, berechnet sich aus den Oberflächenenergien wie folgt [55]:

$$\gamma(v) = \Delta\gamma[1 + f(v)] \quad (16)$$

$f(v)$  Energiedissipation in der Rissumgebung

$v$  Rissspitzengeschwindigkeit

Wenn der Rissfortschritt die Adhäsionsverbindung komplett durchlaufen ist und eine Ablösung des Steines von der Gummierung zur Folge hat, wird der Stein abgeworfen. An diesem Punkt besitzt der Stein die kinematischen Eigenschaften der Zykloidenbahn. Diese stellen die Startwerte der folgenden Flugbahn dar.

### 2.3.3 Kinematik des Steinfluges

Die Flugbahn eines Steines nach dem Abwurf wird durch einen schiefen Wurf beschrieben, der durch die Anfangsbedingungen des tangentialen Abwurfs von der zykloiden Bahnkurve bestimmt ist.

Der Abwurfwinkel kann hierbei durch die Vertikal- (6) und Horizontalgeschwindigkeit (7) des Steins beim Abwurf berechnet werden.

$$\alpha = \arctan \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \arctan \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi} = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arccot} \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi} = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2} \quad (17)$$

Der Definitionsbereich von  $\varphi$  ist  $0 < \varphi < 2\pi$ . Die x-Komponente der Geschwindigkeit bleibt während des Fluges unverändert, wohingegen die y-Komponente durch die Gewichtskraft abnimmt.

$$\dot{y} = \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot r - g \cdot t \quad (18)$$

Liegt die Flugbahn des Steines auf Kollisionskurs mit einer Komponente des Fahrzeuges kommt es zu einem Stoßvorgang.

## 2.4 Stoßphysik des Aufpralls / Restitutionskoeffizient

Beim Aufprall von Steinen auf unterschiedliche Materialien und Oberflächen spielt eine Vielzahl von Mechanismen eine Rolle. Ein Stoß kann elastisch, vollständig plastisch oder inelastisch (eine Mischform) sein. Meist handelt es sich dabei um einen inelastischen Stoß, bei der die innere Energie der Partner verändert wird. Die Elastizität des Stoßes wird mit dem Restitutionskoeffizient  $R$  definiert, der die Änderung der kinetischen Energie beschreibt. Der Wert dieses Koeffizienten ist von geometrischen und materialspezifischen Einflussgrößen sowie von den Umgebungsbedingungen abhängig. Diese Eigenschaften sind für den Grad der Deformation des Targets verantwortlich, der durch die kinetische Energie des Aufprallkörpers verursacht wird. Die Deformation ist überwiegend plastisch und hinterlässt einen bleibenden Schaden [12], sowie eine entsprechende Temperaturerhöhung, was aber eine größere Rolle bei den Beschädigungsmechanismen des Beschichtungssystems spielt [2, 3]. Jedoch wird nicht nur Deformation im Target erzeugt, sondern auch im Projektil, das durch spröde Eigenschaften sogar zerbrechen kann. Zusätzlich können Eigenschaften des Projektils nach dem Stoß, wie zum Beispiel eine aufgeprägte Rotationsenergie, die Energiebetrachtung beeinflussen [4]. Auch feuchte Filme auf Oberflächen können die Rückprallgeschwindigkeit durch die kurzzeitige Ausbildung von Kapillarkräften, vor allem bei niedrigen Aufprallgeschwindigkeiten, reduzieren [5]. Diese Eigenschaften erschweren die Betrachtung der auftretenden Energie des Stoßprozesses erheblich, was eine Kalkulation des Restitutionskoeffizienten erschwert. Darum wird der normale und tangential Restitutionskoeffizient ( $R_n$  und  $R_t$ ) meist empirisch ermittelt. Hierbei bildet die normale und tangential Rück- und Aufprallgeschwindigkeit einen Quotienten und kann mit Formel (19) und (20) beschrieben werden.

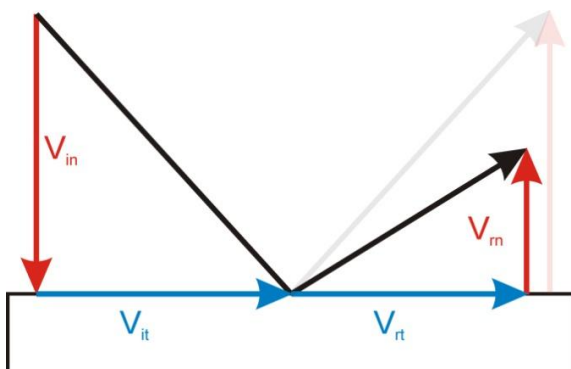


Abb. 13 Geschwindigkeitsverlust eines Körpers vor und nach einem Aufprall

$$R_n = \frac{v_{rn}}{v_{in}} \quad (19)$$

$$R_t = \frac{v_{rt}}{v_{it}} \quad (20)$$

$v_{rn}$  und  $v_{in}$  stehen für die Größe der Normalkomponente der Rück- und Aufprallgeschwindigkeit. Das Gleiche gilt für den Index t, der für die tangentielle Ausrichtung steht [13].

Der Restitutionskoeffizient kann hierbei von 1 (elastisch) bis 0 (plastisch) variieren. Die meisten Materialien zeigen eine Geschwindigkeitsabhängigkeit des Restitutionskoeffizienten [56]. Hierbei kann der Wert bei niedrigen Geschwindigkeiten ungefähr 1 betragen, wohingegen er sich bei hohen Geschwindigkeiten an 0 annähert, was einen vollständig plastischen Stoß charakterisiert. (Abb. 14)

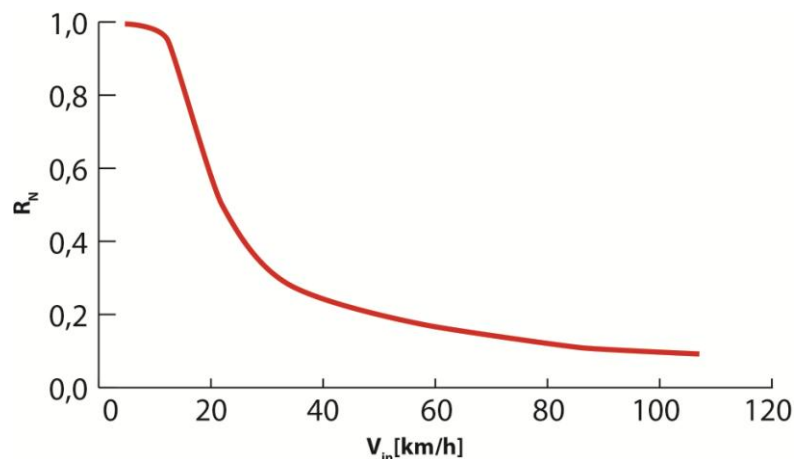


Abb. 14 Restitutionskoeffizient  $R_N$  in Abhängigkeit von der normalen Aufprallgeschwindigkeit  $v_{in}$

Durch die plastische Verformung des Substrates werden Spannungen in das Beschichtungssystem eingebracht, das verschiedene Auswirkungen auf Beschädigungen von Beschichtungssystemen haben kann.

## 2.5 Beschichtungssysteme

In der Automobilindustrie werden organische, metallische oder eine Kombination aus Beschichtungen (Duplexbeschichtungen) appliziert.

Metallische Beschichtungen werden vor allem in Form von Zink genutzt. Diese schützen das Substrat durch einen kathodischen Korrosionsschutz, wohingegen



organische Beschichtungen eine physikalische Barriere zwischen Medium und Substrat bilden. Duplexbeschichtungen ermöglichen beides. Erst wenn die physikalische Barriere zerstört ist, setzt die kathodisch schützende Funktion der Zinkschicht ein.

In der Automobilindustrie werden organische Beschichtungen vor allem in Form einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) oder einer Pulverbeschichtung auf blanke oder verzinkte Substrate aufgebracht, die zur Verbesserung der Haftung und Verlangsamung der Delaminationsgeschwindigkeit zusätzlich mit einer Konversionsschicht zwischen Polymer und Substrat versehen werden.

Es können auf diese Polymerbeschichtungen weitere Schutzschichten oder optische Schichten aufgebracht werden, die einen zusätzlichen Korrosionsschutz und eine bessere optische Wahrnehmung bieten. Diese Systeme werden Multischichtsysteme genannt und an exponierten Bereichen und auf der Außenhaut eingesetzt.

### 2.5.1 Konversionsschichten

Konversionsschichten werden vor der eigentlichen Beschichtung aufgetragen. Diese meist aus einer Phosphatschicht bestehende Lage bietet einen kurzzeitigen Korrosionsschutz und einen guten Haftgrund für Lacke.

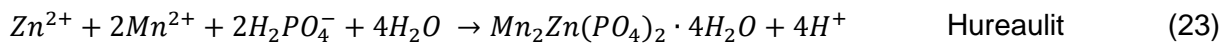
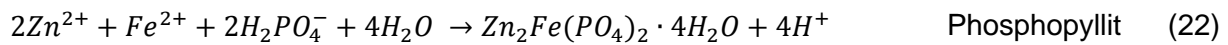
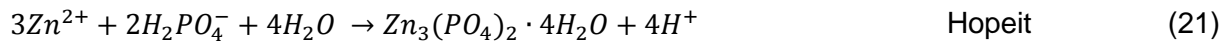
Die Entstehung der Phosphatschicht ist immer mit einer Beiz- oder Korrosionsreaktion des Grundmaterials verbunden. Phosphatschichten werden durch Spritzen, Übergießen oder Tauchen abgeschieden, wobei zwischen schichtbildender und nichtschichtbildender Phosphatierung unterschieden wird. Im Folgenden wird nur die hier technisch interessante Variante der schichtbildenden Phosphatierung betrachtet.

Die schichtbildende Phosphatierung erfolgt aus verdünnten, wässrigen Lösungen. Es werden Schichten mit folgender Zusammensetzung unterschieden:

- Zinkphosphat (Hopeit)
- Zinkeisen(II)phosphat (Phosphophyllit)
- Zinkmanganphosphat (Hureaulit)

Das Flächengewicht der abgeschiedenen Phosphatschichten beträgt bei diesem Verfahrenstyp zwischen 1 und 4 g/m<sup>2</sup>, was einer Schichtdicke von zirka einem µm entspricht.

Reaktionen bei der Schichtbildung auf Stahl [57]:



Zinkphosphatschichten sind außerordentlich fest mit dem Trägermaterial (Fe, Zn) verbunden. Diese als Epitaxi (bevorzugte Orientierung der ZnPh-Kristalle zum Substrat-Kristallgitter) bezeichnete Art des Verbundes zwischen Substrat und darauf abgeschiedenen Überzug wird als eine der Hauptursachen angesehen für die besonders schützenden Eigenschaften von Phosphatüberzügen [58].

Bereits die Phosphatschicht allein gewährt für kurze Zeit Korrosionsschutz. Jedoch ist diese Wirkung nur gering, da kristalline Strukturen in Form von Plättchen oder Körnern gebildet werden, die keine geschlossene Schicht bilden. Bei einer Phosphatierung werden immer noch ca. 0,5 % des Stahls ungeschützt der Atmosphäre ausgesetzt.

### 2.5.2 Kathodische Tauchlackierung (KTL)

Anstriche werden durch folgende Verfahren aufgebracht:

- Streichen,
- Spritzen,
- elektrophoretisches Tauchlackieren (anodisch / kathodisch),
- Pulverbeschichtung.

Die in der Automobilbranche wichtigste Art des Beschichtens ist die elektrophoretische Tauchlackierung (ETL), speziell die kathodische Tauchlackierung (KTL), bei der die Karosserie / Bauteil als Kathode im Beschichtungsprozess geschaltet ist.

Bestandteile einer Beschichtung:

- Bindemittel,
- Pigmente (korrosionsschützende Wirkung),
- Hilfsstoffe.

Bei der kathodischen Elektrotauchlackierung werden wassergelöste Epoxidharze unter Anlegen einer Gleichspannung auf das zu beschichtende Werkstück aufgebracht. Anschließend wird der Lack bei einer Temperatur von 170 - 200 °C eingebrannt. Vorteil der kathodischen Tauchlackierung ist die hohe Umweltfreundlichkeit durch den effizienten Auftrag wasserlöslicher Lacke und die gleichmäßige und reproduzierbare Schichtdicke.

Der für die Problemstellung wichtigste Aspekt ist die gute Korrosionsbeständigkeit. Ferner wird eine gute Abdeckung auch komplizierter Geometrien sowie von Hohlräumen erreicht. Darum wird eine KTL-Beschichtung besonders bei Teilen angewendet, die komplett beschichtet werden sollen. Der gute Korrosionsschutz einer KTL-Beschichtung wird durch die vollständige Beschichtung der Oberfläche erzeugt, was durch den Beschichtungsprozess mit Elektroden erreicht wird.

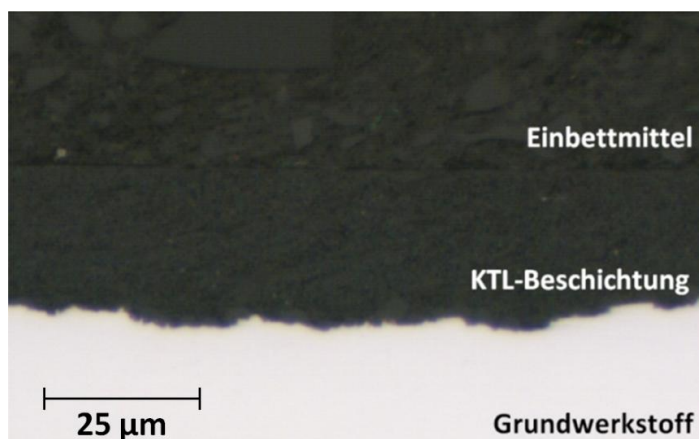


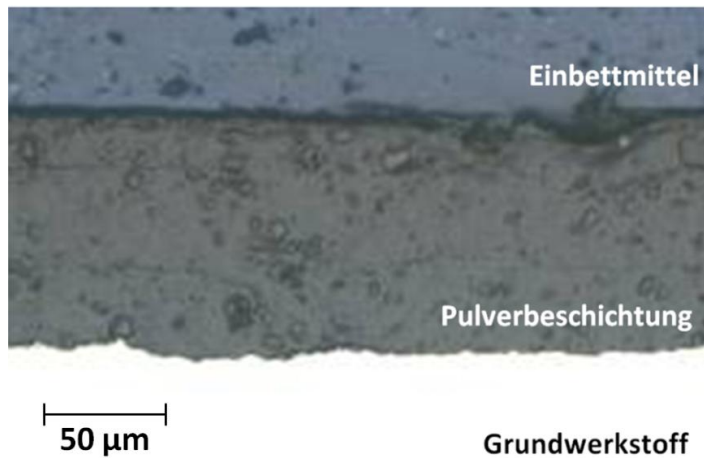
Abb. 15 Schliffbild einer KTL-Beschichtung

### 2.5.3 Pulverbeschichtung

Pulverbeschichtungen sind im Vergleich zu KTL-Schichten nicht nur für den Korrosionsschutz zuständig, sondern sollen auch eine dekorative Aufgabe übernehmen sowie vor Chemikalien schützen. Pulverbeschichtungen können durch spezifische Verfahren bedarfsgerecht aufgetragen werden. Hierbei können unterschiedliche Schichtdicken erzeugt werden.

Pulverlacke werden entweder elektrostatisch (Aufladung erfolgt über eine Elektrode), tribostatisch (Aufladung erfolgt durch Reibung) oder im Wirbelsinterverfahren (heißes Werkstück wird in fluidisiertes Pulver getaucht) aufgebracht.

Bei Pulverbeschichtungen können im Vergleich zu KTL-Beschichtungen größere Schichtdicken erreicht werden.



**Abb. 16 Schliffbild einer Pulverbeschichtung**

#### 2.5.4 Multischichtsystem

Ein Multischichtsystem in der Automobilindustrie besteht aus verschiedenen Schichten, die jeweils spezielle Aufgaben erfüllen (Abb. 17).



**Abb. 17 Aufbau eines Multischichtsystems in der Automobilindustrie**

Es werden als Substrate vorverzinkte Bleche eingesetzt, die eine Zinkschichtdicke von ca. 7µm aufweisen. Auf diese kathodisch schützende Schicht wird eine Phosphatierung zur Verbesserung der Haftung aufgebracht. Dadurch wird auch der Delaminationsfortschritt verlangsamt. Die anschließende KTL-Schicht dient dem Korro-

sionsschutz im Innen- und Außenbereich, allen Hohlräumen, Überlappungen und Verbindungen. Hierbei wird das eingesetzte Epoxy-Bindemittel durch eine Spannung von ca. 220V als positiv geladene Dispersionsteilchen auf der Karosserie abgeschieden. Beim Einbrennvorgang vernetzen die Epoxidharzbestandteile mit den enthaltenen Isocyanaten. Die KTL Schicht ist vor allem für den Korrosionsschutz zuständig und bei Steinschlagbeschädigungen intakt bleiben.

Auf diese KTL-Schicht wird ein Füller an der Außenhaut durch Spritzen aufgebracht, der Unebenheiten ausgleichen soll und dem Steinschlagschutz dient. Die duktilen Eigenschaften des Füllers verbessern die Elastizität des gesamten Lackaufbaus.

Der Füller dämpft einen Steinschlag und verhindert ein großflächiges Abplatzen von Schichten und dient als Sollbruchstelle für hohe mechanische Belastungen, damit die KTL-Beschichtung nicht beschädigt wird. Füller bestehen aus Bindemitteln auf Polyurethanbasis (PUR) bzw. PUR-modifizierter Polyester.

Die Decklackierung ist in Deutschland meist durch eine Zwei-Schicht-Decklackierung ausgeführt, wobei ein Basislack mit Bunt- und Glanzpigmenten als erstes auf den Füller aufgebracht wird. Diese wässrigen Systeme können aus Polyurethan-, Polyesterbindemitteln oder Polyacrylaten sowie aus Hybridsystemen bestehen. Der Basislack wird über Spritzen mit elektrostatischer Unterstützung aufgetragen. Um den Glanz der Beschichtung zu erzeugen, wird ein Klarlack aufgebracht. Hierbei hat die Decklackierung neben optischen Effekten wesentliche Schutzaufgaben gegen chemische und physikalische Umwelteffekte [59]. Mechanische Beschädigungen durch Steine mit geringen Aufprallenergien werden hier bereits vermieden. Diese Aufgaben werden durch Polyacrylate vernetzt mit Melaminharzen oder Isocyanaten gewährleistet.

Diese organischen Beschichtungen werden durch Ihre Wasseraufnahme plastifiziert. Hierbei werden die Glasübergangstemperatur sowie die Pendelhärte der Beschichtung bei Einwirkung von Feuchte herabgesetzt [60].

### 2.5.5 Steinschlagschutzsysteme

Zusätzliche Steinschlagschutzsysteme werden an exponierten Steinschlagbereichen eingesetzt, an denen Standardbeschichtungssysteme nicht mehr ausreichen. Im Folgenden werden in der Automobilindustrie geläufige Steinschlagschutzsysteme vorgestellt [61].

### **Steinschlagschutzfolien (Polyurethanfolie)**

Steinschlagschutzfolien (Dicke ca. 100  $\mu\text{m}$ ) werden an steinschlaggefährdeten Stellen der Außenhaut appliziert. Diese Folien werden durch ihre Transparenz kaum wahrgenommen und stellen einen Schutz an exponierten Stellen der Karosserie vor flach aufprallenden Steinen mit geringen Normalimpulsen dar. Der Aufprall der Steine wird durch Polyurethanfolien gedämpft und Kratzer in der Decklackierung werden somit vermieden.

### **Steinschlagschutzkappen**

Steinschlagschutzkappen werden aus Kunststoff hergestellt und dienen dem Schutz von Hinterachskomponenten im Unterflurbereich. Diese Bereiche weisen Steinschläge mit hohen Impulsen auf, die durch Folien nicht mehr gedämpft werden können. Steinschlagschutzkappen werden deshalb an exponierten Lenkern und am Hinterachsträger angebracht um diese vor direkten Treffern zu schützen.

### **PVC**

Steinschlagschutzsysteme können durch zusätzliche steinschlagbeständige Schichten ausgeführt sein. Hierzu werden Schichten aus PVC-Materialien, bis zu Dicken im mm-Bereich, an exponierten Stellen aufgetragen. Anschließend können zum weiteren Schutz PVC-Plastisolen oder Polyurethan aufgetragen werden.

Diese Zusatzmaßnahmen schützen die Komponenten durch das Dämpfen des Aufpralls. Jedoch sind die Grenzbelastungen, gegen die Schichtsysteme beständig sind, nicht prognostizierbar. Darum werden diese Schutzsysteme meist erst nach Prüfungen mit fahrbaren Prototypen appliziert, falls das Standardschichtsystem den Belastungen nicht standgehalten hat. Im Folgenden soll darum näher auf den Beschädigungsmechanismus von Beschichtungssystemen eingegangen werden.

## **2.6 Steinschlaginduzierte Beschädigungen**

Multischichten können durch eine Steinschlagbelastung adhäsiv (zwischen zwei Grenzflächen) oder kohäsiv (innerhalb einer Schicht) versagen [6]. Die auftretenden komplexen Beschädigungsmechanismen werden innerhalb von Mikrosekunden durch Druck-, Scher- und Zugspannungen in das Material eingebracht [62]. Entstan-

dene Schäden an Beschichtungen treten in Form eines Schichtverlusts, einer Delamination an der Metall-Polymer-Grenzfläche oder einer Kombination aus beiden auf. Unterschiedliche Einflussgrößen werden durch die Eigenschaften des Aufprallkörpers, des Stoßes, der Umwelt, der Beschichtung und des Substrates erzeugt. Diese Faktoren haben einen Einfluss auf den Stoßvorgang und den Grad sowie die Art der Beschädigung. Dabei verursacht jeder Aufprall Druckwellen in beiden Stoßpartnern, die je nach Ausprägung des Druckzustandes im Material auch zu Schockwellen führen können. Hierbei ist aber vor allem die Aufprallgeschwindigkeit ein wichtiger Einflussfaktor. Bei niedrigen Geschwindigkeiten im Bereich von  $10^{-2}$  m/sec können Druckwellen vernachlässigt werden und die Hertzsche Kontakttheorie findet Anwendung. Hierbei werden die maximalen Druckspannungen zwischen Projektil (Notation 1) und Target (Notation 2) folgendermaßen berechnet [7]:

$$P_{max} = \frac{4}{3} \left( \frac{5}{4} \pi \rho_1 \right)^{3/5} (K_1 + K_2)^{-2/5} V^{6/5} R^2 \quad (24)$$

$$a = (0,75PR(K_1 + K_2))^{1/3} \quad (25)$$

$$\alpha = \left( 0,5625 \frac{P^2(K_1 + K_2)^2}{R} \right)^{1/3} \quad (26)$$

$$K = \frac{(1 - v^2)}{E} \quad (27)$$

$a$  = Radius der Kreiskontaktfläche

$\alpha$  = Eindringtiefe

$\rho_1$  = Dichte des Projektils

$V$  = Geschwindigkeit des Projektils

$v$  = Querkontraktionszahl

$R$  = Radius des Projektils

$E$  = Modul

Für höhere Geschwindigkeiten müssen jedoch instationäre Schockwellen berücksichtigt werden, die sich ausbreiten, wenn das Material sich nicht parallel zur Wellen-

front ausdehnen kann. Es kommt in diesem Fall zu einer eindimensionalen Deformation durch Druck, begleitet von einer Temperaturerhöhung durch die Stoßverdichtung [2, 3].

Diese Stoßverdichtung kann durch einfache Formeln der Massen- und Impulserhaltung der Zustände vor und nach einer Schockwelle, beschrieben werden [7]. Die Massenerhaltung

$$\rho_s \cdot (U - V) = \rho_0 \cdot U \quad (28)$$

wird durch  $\rho_s$  und  $\rho_0$  der Dichte hinter und vor der Wellenfront mit der Wellengeschwindigkeit  $U$  und der Partikelgeschwindigkeit  $V$  beschrieben. Das wichtigste Gleichgewicht wird jedoch von der Gesetzmäßigkeit der Impulserhalten dargestellt und beschreibt den Druck hinter einer Schockwelle.

$$\sigma_s = \rho_0 \cdot V \cdot U \quad (29)$$

Diese Gleichungen sind auch bekannt als die Rankine-Hugoniot-Gleichungen. Das Produkt  $\rho_0 \cdot U$  aus der Rankine-Hugoniot-Gleichung wird auch als Schockimpedanz  $Z$  bezeichnet. Dabei entsteht beim Aufprall eines Projektils ( $p$ ) auf einen Target ( $t$ ) mit unterschiedlichen Impedanzen folgende Stoßspannung unter Annahme gleicher Spannungsverhältnisse und Geschwindigkeiten von Target und Projektil nach dem Aufprall [7]:

$$\sigma_s = \frac{V_0 \cdot Z_p \cdot Z_t}{Z_p + Z_t} \quad (30)$$

Diese Druckwellen können an freien Oberflächen reflektieren und eine Zugspannung im Material verursachen. Zusätzliche Zugspannungen können an den Rändern des Kontaktbereichs von Projektil und Target auftreten. Ramamurthy hat für sphärische Projektile den Wert maximaler Radialspannungen  $(\sigma_r)_{max}$  errechnet [8].

$$(\sigma_r)_{max} = \frac{(1 - 2 \cdot V_2) \cdot P^{\frac{1}{3}} \cdot R^{-\frac{2}{3}}}{\pi \cdot [3 \cdot (K_1 + K_2)]^{\frac{2}{3}}} \quad (31)$$



Jedoch ist nicht nur die Größe der Spannung ausschlaggebend, sondern auch die auftretende Formänderungsgeschwindigkeit. Hierbei sind vor allem Polymere durch ihre starke Frequenzabhängigkeit betroffen, die in ein glasartiges steifes Verhalten bei hohen Dehngeschwindigkeiten oder in ein elastisches Verhalten bei sehr niedrigen Dehngeschwindigkeiten übergehen können [9].

Wie an der Stoßwellentheorie zu erkennen ist, können verschiedenste Spannungen in Materialien eingebracht werden und unterschiedliche Beschädigungen hervorrufen. Beschichtungen können zum Beispiel durch Stoßwellenkompression oder Phosphatschichten durch reflektierte Zugspannungswellen versagen. Weitere Beschädigungen könnten durch ein Moment, das eine Biegung des Substrates hervorruft, eingebracht werden. Jedoch können diese Verletzungen auch durch starke Scher- und Zugspannungen um die Aufprallfläche erzeugt werden [7]. Papini und Spelt haben gezeigt, dass Scherspannungen zwischen Schichten eine Delamination (Adhäsionsbruch) hervorrufen, was durch einen quasistatischen Mechanismus erzeugt wird [10, 11].

Durch die Vielfältigkeit von Spannungen, Einflussgrößen und Beschädigungsmechanismen können verschiedenste Steinschlagbeschädigungen in ein Beschichtungssystem eingebracht werden.

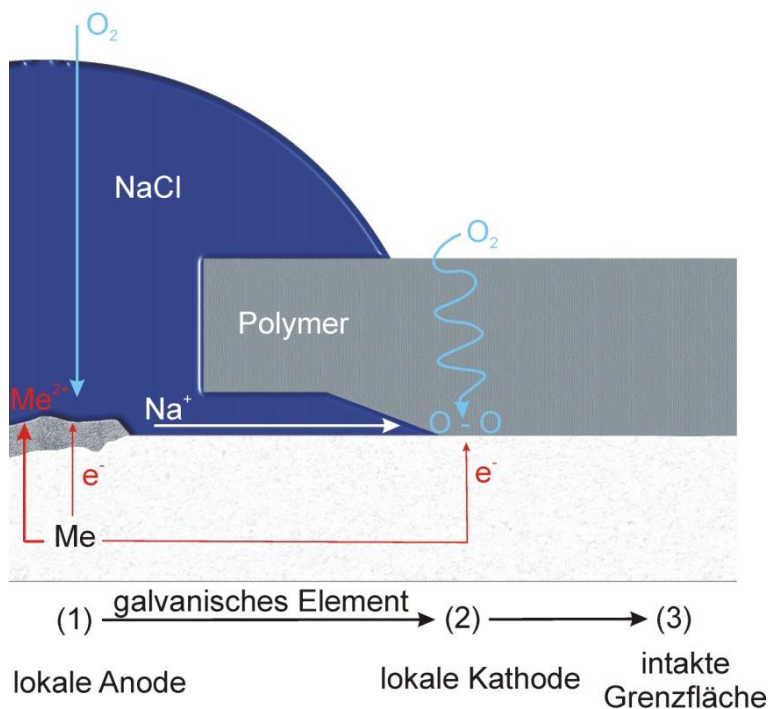
## 2.7 Korrosionsfortschritt nach Beschädigung

### 2.7.1 Delamination von Polymerbeschichtungen

Verschiedene Beschichtungssysteme sollen die komplexen Korrosionsmechanismen unterbinden. Diese Schichtsysteme werden mit spezifischen Eigenschaften ausgestattet, um bestmöglich vor Korrosion und Steinschlag zu schützen, indem sie als physikalische Barriere zwischen Substrat und korrosiven Medien wirken. Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass die Diffusion von Wasser und Sauerstoff durch eine Polymerbeschichtung nicht gänzlich unterbunden wird und sich eine hohe Konzentration an der Polymer-Substrat Grenzfläche bilden kann, die keine Beschränkung der Korrosionsgeschwindigkeit darstellt [63]. Eine Diffusion von Ionen wird durch die Beschichtung stark gehemmt. Dadurch bilden Polymerfilme einen guten Korrosionsschutz aus, der zusätzlich in der Kinetik der elektrochemischen Reaktion an der Metall-Polymer-Phasengrenze begründet werden kann. Hierbei bildet sich eine diffuse, stark ausgedehnte Doppelschicht aus, die die elektrochemische Reak-

tion extrem hemmt [64]. Wird die Beschichtung durch das Aufprallen von Steinen verletzt, führt dies zu Schichtverlust oder einer Delamination an der Polymer-Substrat Grenzfläche, die es korrosiven Medien ermöglicht sich an der Substratoberfläche anzureichern und einen Elektrolyten auszubilden [7]. Korrosion breitet sich von lokalen Defekten mit einer Delaminationsgeschwindigkeit der Polymerbeschichtung in Abhängigkeit der Art und der Konzentration der Ionen im Elektrolyt aus. Konversionsschichten, die eine zusätzliche Haftung der Polymerschicht auf dem Substrat generieren sollen, behindern die Sauerstoffreduktion und verlangsamen somit die Korrosionsgeschwindigkeit [65].

Im Folgenden wird eine Polymerschicht betrachtet, die bis zum Substrat beschädigt ist und einen Zugang des Elektrolyten auf der Metalloberfläche ermöglicht (Abb. 18). Ausgehend von diesem Defekt wurde der Delaminationsvorgang auf Stahl und verzinkten Substraten in zahlreichen Arbeiten untersucht [66-68].



**Abb. 18 Delaminationsmechanismus bei polymerbeschichtetem nicht verzinktem Stahl**

Diese beschreiben den Beginn der Korrosion durch eine Ansammlung eines Elektrolyten (hier Natriumchlorid und Wasser) im Defektbereich, der das Metall mit hoher Stromdichte durch die Sauerstoffreduktion auflöst. Hierbei liegt ein Mischpotential im Bereich der aktiven Auflösung des Stahls vorliegt.

Diese Mechanismen bilden im Defekt eine lokale Anode mit folgender Reaktion aus:



In der Unterwanderungsfront an der Polymer-Substratgrenzfläche bildet sich eine Kathode aus, wobei durch die Sauerstoffreduktion Hydroxilionen entstehen:



Doch hemmen intakte Bereiche deutlich die beiden Reaktionen und bilden ein positives Mischpotential. Dieser Mechanismus der kathodischen Delamination wurde von Stratmann und Leng mit der Rasterkelvinsonde genau untersucht [16-19].

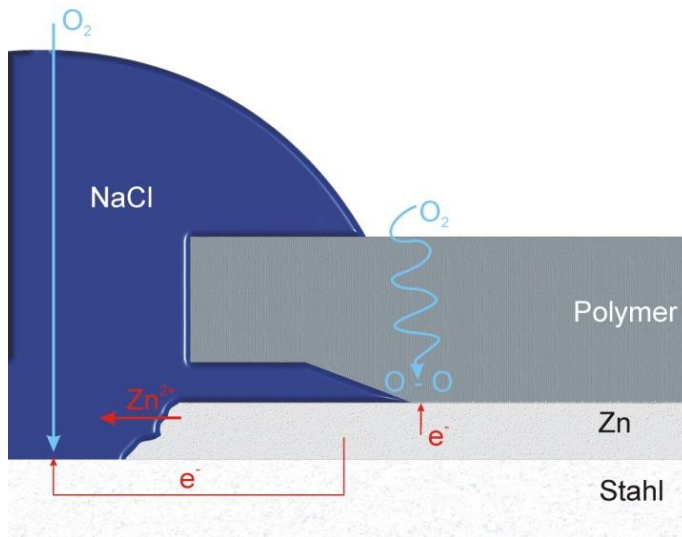
Durch die neue Messmethode konnte das kathodische Mischpotential im Defekt und das anodische Mischpotential an der intakten Grenzfläche, das ein galvanisches Element bildet, analysiert werden. Es wurde ermittelt, dass die elektrochemischen Mechanismen für die Enthftung der Beschichtung verantwortlich sind.

Die anodische Teilreaktion gleicht hierbei die kathodischen Teilströme der Sauerstoffreaktion im Defekt und an der Unterwanderungsfront aus. Durch eine ständige Anreicherung von Hydroxilionen an der Unterwanderungsfront führt dies zur Alkalisierung der Metall-Polymer-Grenzfläche und es können pH-Werte bis zu 14 erreicht werden [66, 69]. Diese Überschussladung wird durch die Wanderung von Alkaliionen entlang der Phasengrenze ausgeglichen, damit der Redoxprozess weiter ablaufen kann. Darum ist die Diffusionsgeschwindigkeit dieser Alkalikationen ausschlaggebend für die Delaminationsgeschwindigkeit einer Beschichtung [66].

Der Bindungsbruch zwischen dem Substrat und dem Polymeren ist auf den erhöhten pH-Wert zurückzuführen, wird aber mit unterschiedlichen Ansätzen beschrieben. Die von zahlreichen Autoren favorisierte Theorie einer Verseifung von Esterbindungen zwischen Polymerfilm und Metalloberfläche steht gegenüber von weiteren Theorien, die den Delaminationseffekt rein mit der Alkalisierung der Grenzfläche beschreiben. Wroblowa verfolgte die Theorie des Abbaus der Polymerunterseite durch hochreaktive Zwischenprodukte während der Sauerstoffreduktion [70-72].

Diese Mechanismen können auch für verzinkte Grundmaterialien angenommen werden. Jedoch können durch die Art des Defektes zwei Mechanismen unterschieden

werden. Eine Beschädigung der Polymerschicht ohne eine Zerstörung der Zinkschicht, führt zu einer kathodischen Delamination, vergleichbar wie bei Stahlsubstraten. Bis zum Grundmaterial reichende Defekte erzeugen eine anodische Auflösung der Zinkschicht, die das Stahlsubstrat vor Korrosion schützt (Abb. 19) [73].



**Abb. 19 Delaminationsmechanismus von polymerbeschichtetem verzinktem Stahl**

## 2.7.2 Korrosionsmechanismus

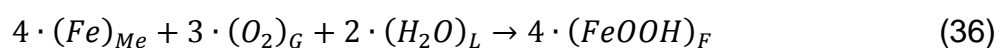
### 2.7.2.1 Eisen

Die Korrosion von Eisen läuft unter einer mehrstufigen Redoxreaktion ab, die durch die Sauerstoffreduktion und die anodische Eisenauflösung geprägt ist. Bei der Betrachtung der elektrochemischen Spannungsreihe reiner Metalle bei 25 °C [74] wird verdeutlicht, dass Eisen bestrebt ist, stabilere Verbindungen unter Anwesenheit eines Elektrolyten auszubilden und in seinen Ursprungszustand zurück will.

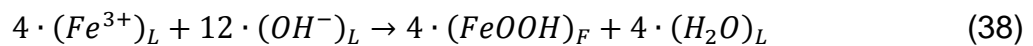
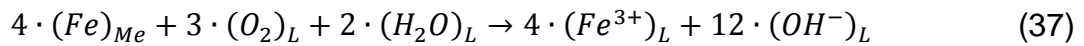
$$U_0(Fe/Fe^{2+}) = -0,44 \text{ V} \quad (34)$$

$$U(Fe/Fe^{3+}) = -0,04 \text{ V} \quad (35)$$

Die wichtigste Korrosionsreaktion von Eisen mit Luftsauerstoff und kondensiertem Wasser beschreibt folgende Gleichung [75]:



Bei dieser Reaktion geht als erstes Sauerstoff aus der Gasphase in einen gelösten Zustand über. Im nächsten Schritt wird Eisen in einen liquiden dreiwertigen Zustand  $(Fe^{3+})_L$  reduziert und reagiert mit Hydroxylionen  $(OH^-)_L$  wie in (37) und (38) dargestellt.



Die Reaktion der Auflösung und Wiederabscheidung des Eisens verursacht die Porosität der Korrosionsschichten und ihre schlechte Hemmung der Korrosionsreaktion, die mit vielen weiteren Teilschritten beschrieben werden kann. Während der Redoxreaktion können verschiedene Bestandteile in der Korrosionsschicht gebildet werden, die überwiegend aus rhombisch kristallisierten  $\alpha$ - $FeOOH$  (Goethit) bestehen. Es kann aber auch rhombisch kristallisiertes  $\gamma$ - $FeOOH$  (Lepidokrokit), trigonal kristallisiertes  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  (Hämatit) und kubisch kristallisiertes  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  (Maghämmit) gebildet werden [75]. Schichten aus Passivoxiden des Eisens können im Gegensatz zu porösen Korrosionsschichten eine Schutzschicht ausbilden, die aber durch Chloride zerstört werden kann. Durch diesen Mechanismus kann ein lokaler Angriff des Substrates initiiert werden und Lochkorrosion verursachen. Hierbei wird an den passiven kathodischen Bezirken Sauerstoff reduziert und eine sogenannte Membran kann sich unter den Korrosionsschichten bilden, unter der Eisen zweiwertig in Lösung geht. Das reduzierte Eisen kann durch die Membran diffundieren, um durch Oxidation mit Sauerstoff in  $\gamma$ - $Fe(OH)_3$  überzugehen (Abb. 20) [75].

Hierbei wird verstärkt Material an lokalen Stellen abgetragen.

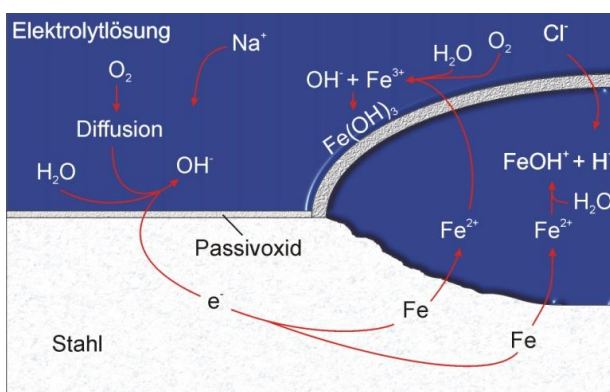


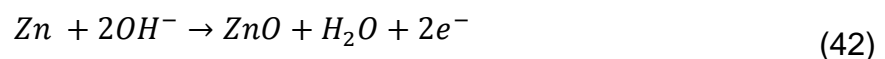
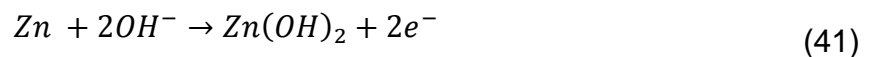
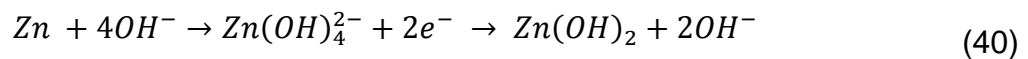
Abb. 20 Korrosionsmechanismus des in schwach alkalischer Lösung teilaktiven Eisens

## 2.7.2.2 Zink

Das negative Standardpotential von Zink (39) [74] hat eine aktive Auflösung zur Folge, jedoch kann diese durch Oxide und Hydroxide gehemmt werden.

$$U_0(\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}) = -0,76 \text{ V} \quad (39)$$

Bei der Auflösung von Zink in leicht alkalischem Milieu handelt es sich um folgende Reaktionsmechanismen:



Die Produkte der Reaktion bestehen aus porösen Hydroxidfilmen  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  und dichten nicht ganz porenfreien Oxiden  $\text{ZnO}$ , die eine gute Schutzschicht ausbilden. Jedoch gehört Zink zu den amphoteren Metallen, deren Oxide und Hydroxide in Säuren und Alkalien leicht löslich sind. Auch Chloride können diese Korrosionsschichten zerstören.

Bei der Verwendung von Zink als Überzug für unlegierte Stähle kann durch eine Verletzung der Schicht ein Kontaktelement hervorgerufen werden. Durch die elektrisch leitende Verbindung stellt sich eine Polarisierung des Zinks in anodische und bei Eisen in kathodische Richtung ein und bewirkt eine Auflösung des Zinks [76].

Durch verschiedene umweltbedingte Einflussgrößen kann der Korrosionsmechanismus beeinflusst werden, indem sich Schutzschichten bilden können oder der Korrosionsprozess beschleunigt wird. Diese auf den Korrosionsprozess wirkenden Größen werden im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

### 2.7.3 Korrosionsfaktoren

Viele Einflussgrößen bestimmen den Korrosionsmechanismus und die Geschwindigkeit des Materialabtrags in Abhängigkeit von Feuchtephasen, Zusammensetzung des anliegenden Mediums und der Temperatur [77-80].

Diese Faktoren können in chemische und physikalische Einflüsse unterteilt werden. Zu den chemischen Einflüssen wird die Feuchtigkeit, Sauerstoff,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HNO}_3$ , Salzgehalt, Staubanteil, säurebildende Gase,  $\text{CO}_2$  und pH-Wert gerechnet. Physikalische Einflussgrößen wie Temperatur, Luftdruck und Bewegung der Luft können die Korrosionsreaktion zusätzlich beeinflussen.

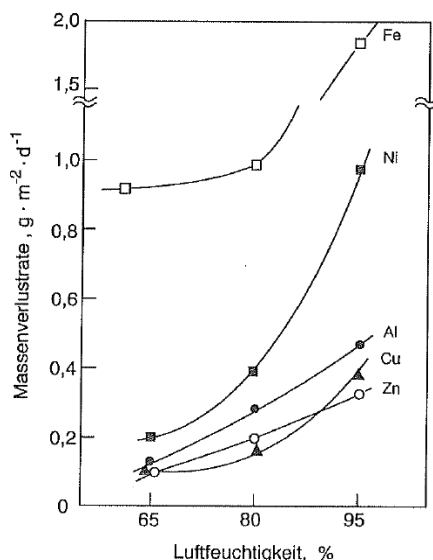
Wiederum können Feuchtephasen durch die relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenstunden, Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Windgeschwindigkeit, Dauer und Frequenz des Regens, Nebels und Taus charakterisiert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Regen die Oberflächen reinigen kann, wohingegen Tau angesammelte Verschmutzungen nicht von Oberflächen entfernt. Zusätzlich kann Regen aber korrosive Medien wie  $\text{H}^+$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  auf Oberflächen ablagern [81]. Verschmutzungen im Elektrolyten können die kritische relative Luftfeuchtigkeit senken. Vor allem Chloride, die wohl am häufigsten auftretenden Verunreinigungen, führen zu einem verstärkten Korrosionsangriff. Dies kann durch Streusalz auf Straßen oder durch salzhaltige Luft in Meeresnähe verursacht werden. An dieser kurzen Aufzählung kann die Vielzahl der Einflussgrößen und deren Wirkung untereinander erkannt werden. Darum wird im Folgenden nur auf in diesem Zusammenhang relevante Größen wie Feuchtigkeit, Temperatur, Chloride, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und ausgewählte Umwelteinflussgrößen eingegangen.

#### 2.7.3.1 Feuchtigkeit / Spritzwasser

Feuchtigkeit ist die Grundlage zur Bildung eines Elektrolyten und somit der wichtigste korrosionsinduzierende Faktor. Ohne die Benetzung der Oberfläche mit Wasser ist die Korrosion vernachlässigbar klein. Jedoch kann schon die Luftfeuchtigkeit einen dünnen Feuchtigkeitsfilm auf der Metalloberfläche erzeugen, der von der Material- und Oberflächeneigenschaft abhängig ist [82]. Dieser Feuchtigkeitsfilm bildet sich bei einem kritischen Grenzwert der relativen Luftfeuchtigkeit aus [83]. Als Befeuchtungs-

dauer gilt die Zeit, in der die relative Luftfeuchtigkeit über 80% beträgt und die Temperatur über 273 K liegt [84].

Eine beschleunigende Rolle beim Materialabtrag spielt auch die Zahl der Feucht-Trocken-Zyklen. Die Befeuchtungsdauer und -intensität wird durch Wärmeaustauschprozesse zwischen Komponente und Atmosphäre, Temperaturdifferenzen innerhalb der Konstruktion, Windgeschwindigkeiten, topographische Orientierung der Oberfläche und den Oberflächenzustand bestimmt. Bei Stahl und Zink ist erkennbar, dass die Korrosionsgeschwindigkeit mit zunehmender Luftfeuchtigkeit ansteigt (Abb. 21). Jedoch hat die Häufigkeit der Kondensationen einen größeren Effekt auf die Korrosionsgeschwindigkeit als die Dauer der Befeuchtung. Eine periodische Kondensation greift stark in das Reaktionssystem ein, da eine Durchdringung der Eisenhydroxide durch den Membraneffekt beschleunigt wird [85].



**Abb. 21 Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Masseverlustrate von Materialien [84]**

### 2.7.3.2 Salze

Salzbelastungen treten konstant aus natürlichen Quellen in Meeresnähe und unregelmäßig anthropogen vor allem beim Salzstreuen durch den Straßenwinterdienst auf. Zusätzlich enthält absetzender Niederschlag im Wesentlichen anorganische und organische Stoffe mit hohen Anteilen an Chloriden und Sulfaten.

Der größte auf den Korrosionsprozess wirkende Chlorideintrag findet an Automobilen durch die Salzstreueung statt. Hierbei gibt es keine Vereinheitlichung der Salzkonzentration und Stärke in unterschiedlichen Ländern. Hauptsächlich kommen NaCl, CaCl<sub>2</sub>



und  $\text{MgCl}_2$  zum Einsatz. Zusätzlich können aber auch Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) gelöst sein, die durch eine Norm auf 2 Massenprozent begrenzt werden [86].

Ein hoher Gehalt an Chloriden in wässrigen Lösungen hat einen sehr großen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit von Metallen [87]. Chloride verursachen bei nahezu allen Metallen starke Korrosionsschäden. Dabei spielen verschiedene Mechanismen eine Rolle. Schutzschichten, die durch Korrosionsprodukte entstanden sind, werden durch Chloride destabilisiert und beeinflussen die deren Passivität. Ferner erhöht sich die Elektrolytleitfähigkeit durch den Anstieg der Ionenkonzentration in der Lösung, die den Elektronenaustausch beschleunigt. Salz wirkt zudem hygroskopisch und erniedrigt somit auch die kritische Luftfeuchtigkeit (Abb. 22), die nötig ist, um Elektrolyte und eine Benetzung auszubilden [88].

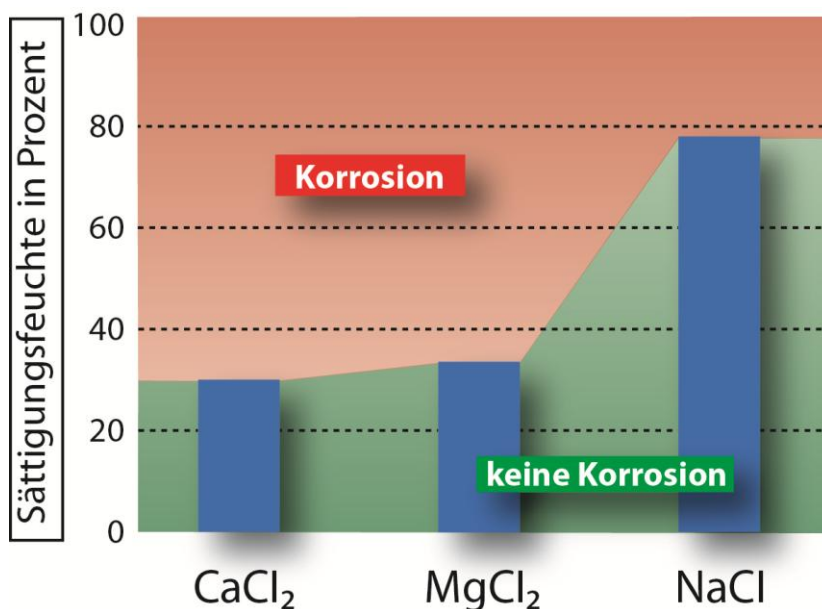


Abb. 22 Hygroskopisches Verhalten einiger Neutralsalze bei Raumtemperatur

Bei Calciumchlorid ist eine Zinksulfatlösung bereits bei zirka 30% Luftfeuchtigkeit und 293 K im Gleichgewicht. Durch die hygroskopische Wirkung von Salzen haben diese die Fähigkeit aus der Luft Wasserdampf zu bilden und als Flüssigkeit auszuscheiden. Jedes Salz hat verschieden starke hygroskopische Eigenschaften und somit auch eine bestimmte Sättigungsfeuchte, bei der es bei einer bestimmten Luftfeuchte gesättigte Salzlösungen bildet. Durch das Salzen der Straßen im Winterhalbjahr und die Restverschmutzungen der Fahrzeuge durch Chloride im Sommerhalbjahr wird die Korrosivität der Elektrolyte gegenüber Automobilbauelementen verstärkt.

Denn durch gelöste Salze im Elektrolyt wird zusätzlich seine Leitfähigkeit erhöht und führt so zu einer höheren Abtragsrate. Jedoch nimmt mit steigender Salzkonzentration auch die Sauerstofflöslichkeit im Elektrolyten ab, was zu einer Senkung der Korrosionsgeschwindigkeit führt (Abb. 23). Für NaCl, das am häufigsten eingesetzte Streusalze auf der Straße, liegt das Korrosionsmaximum bei zirka 3% [89].

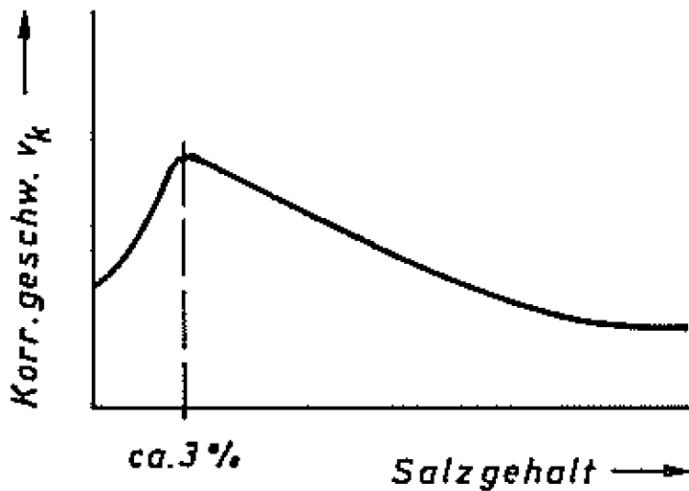


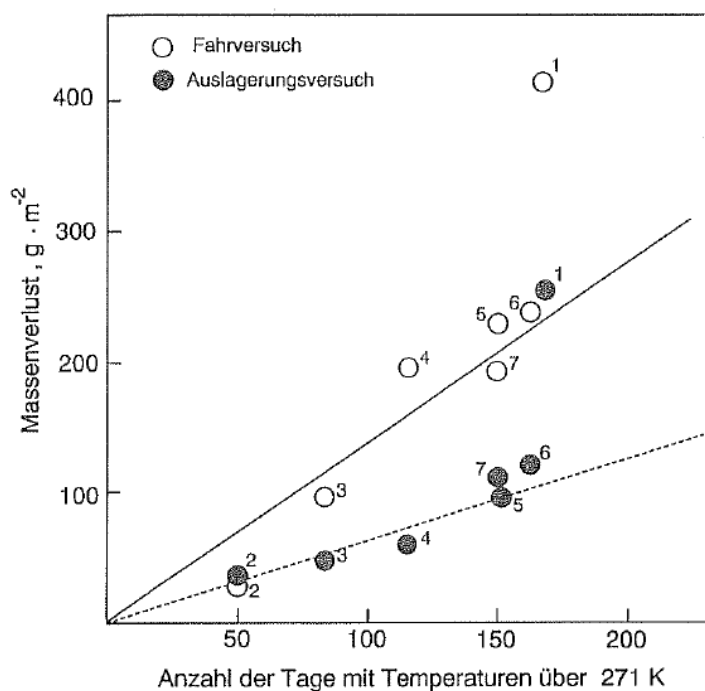
Abb. 23 Einfluss des Salzgehaltes auf die Korrosionsgeschwindigkeit [89]

Chlorid-Ionen verstärken nicht nur den allgemeinen Korrosionsangriff, sondern stören auch die Bildung oder das Bestehen von Deck- und Schutzschichten. Infolge örtlicher Absenkungen des pH-Wertes, aufgrund der Hydrolyse entstehender Korrosionsprodukte, werden anodische Bereiche, zum Beispiel unter Ablagerungen oder in Spalten stabilisiert.

In der Spritzwasserzone (häufiger Wechsel zwischen Feucht- und Trockenphasen) liegt ein hohes Angebot von Sauerstoff und Wasser vor, wobei die Korrosionsgeschwindigkeit erhöht wird, da mehr Sauerstoff für die Korrosionsreaktion zur Verfügung steht. Da die Oxidation aber zu schwerlöslichen Fe(III)-Verbindungen weiterläuft, wird auch die Bildung von Schutzschichten verstärkt [81]. Diese Schutzschichten sind jedoch nicht festhaftend und können mechanisch abgetragen werden. Zudem sind diese Schutzschichten porös und können einen Membraneffekt hervorrufen, der Feuchtigkeit unter diesen Schichten speichert und ein dauerfeuchtes Klima erzeugt.

Untersuchungen des Einflusses von Chloriden durch Streusalze auf das Materialabtragsverhalten wurden durch vergleichende Untersuchungen von Auslagerungen und Fahrversuchen durchgeführt. Probebleche wurden hierbei an Fahrzeugen (direk-

ter Fahrbetrieb) und neben der Fahrbahn (indirekte Beeinflussung) positioniert. Dabei konnte beobachtet werden, dass der Materialverlust von Probeblechen an Fahrzeugen mit der Anzahl der Tage mit Temperaturen über dem Gefrierpunkt zunimmt und deutlich über dem Materialabtrag von neben der Straße ausgelagerten Proben liegt. Der Vergleich der Abtragsraten der beiden Versuchsvarianten ließ erkennen, dass eine starke Zunahme der Korrosionsgeschwindigkeit bei Fahrbetrieb durch das Streuen von Salz erreicht wird, das sich auf den Probeblechen ablagern kann und die Korrosionsgeschwindigkeit beschleunigt (Abb. 24) [84].



**Abb. 24** Masseverlust von Stahl bei Auslagerungsversuchen und Fahrversuchen [84]

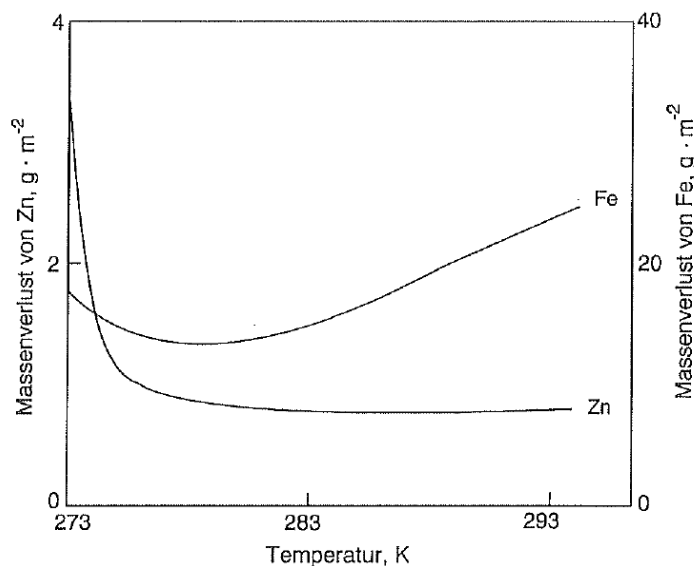
Auslagerungsversuche haben gezeigt, dass die Temperatur einen großen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit hat. Im nächsten Kapitel soll näher darauf eingegangen werden.

### 2.7.3.3 Temperatur

Durch eine Erhöhung der Temperatur wird die chemische Kinetik beeinflusst, da die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur nach Arrhenius ansteigt.

Bei niedrigen Temperaturen über dem Gefrierpunkt ist die Korrosionsgeschwindigkeit sehr gering. Mit Erreichen des Gefrierpunktes des Oberflächenelektrolyten wird die

Korrosionsrate fast null, weil die Diffusion durch Festkörper wesentlich geringer als durch Flüssigkeiten ist. Darum kann im Winter die Korrosionsgeschwindigkeit bei einem gefrorenen Elektrolyten vernachlässigt werden. Jedoch können unterschiedliche Einflussgrößen, wie Chloride den Gefrierpunkt des Elektrolyten senken und Korrosion verursachen. Ein zusätzlicher Effekt bei niedrigen Temperaturen ist der Einfluss der Betauung. In Abbildung 25 ist der Effekt der Betauung dargestellt, durch den selbst im Winter bei wechselnden Temperaturen hohe Korrosionsraten erreicht werden [84]. Diese erhöhten Korrosionsraten sind auf dünne Wasserfilme zurückzuführen, die während eines Betauungsprozesses wirken und einen kurzen Weg der Sauerstoffdiffusion zur Folge haben. Es entsteht ein gut belüfteter Elektrolyt, der die Korrosionsgeschwindigkeit beeinflusst. Zusätzlich führen tägliche Temperaturschwankungen zu Feuchtekondensation auf kälteren Metallteilen. Dieser Effekt wird durch die Masse, die Wärmekapazität, dem Strahlungseinfluss und der Luftbewegung bestimmt [84].



**Abb. 25** Abhängigkeit der Masseverluste von Zink und Eisen bei niedrigen Temperaturen [84]

Bei steigenden Temperaturen hingegen steigt die Reaktionsgeschwindigkeit der Korrosion an. Jedoch kann hierbei ein Wendepunkt der Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl bei 80°C festgestellt werden, da die Sauerstofflöslichkeit des Elektrolyten zurückgeht und die Korrosionsrate abnimmt. Abbildung 26 zeigt den Temperatureinfluss der Korrosion für Eisenwerkstoffe. Bei Werkstoffen aus Zink ist bei einer Erhöhung der Temperatur von 25°C auf 60°C eine Erhöhung der Korrosionsgeschwindigkeit von ca. 1000% zu erwarten [89].

Bei Fahrzeugkomponenten kann im Betrieb eine Temperaturerhöhung auftreten, die korrosionsbeschleunigend (Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit) oder korrosionshemmend (Abtrocknung von Komponenten) wirken kann.

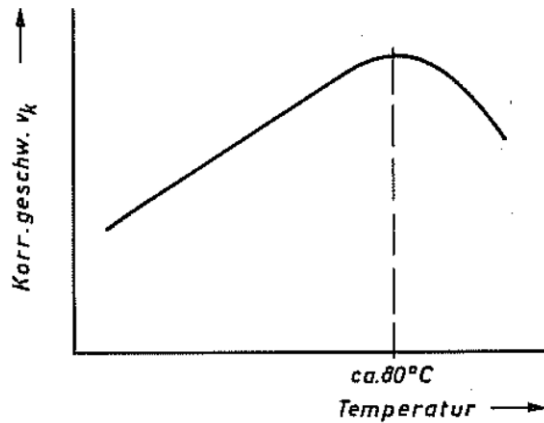


Abb. 26 Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl bei erhöhten Temperaturen [89]

#### 2.7.3.4 pH-Wert

Der pH-Wert eines Elektrolyten ist von Bedeutung, da er die Elektrolytleitfähigkeit beeinflusst. Die Korrosionsmechanismen werden durch den pH-Wert stark beeinflusst, was sich bei verschiedenen Materialien unterschiedlich auswirkt. Er ist von vielen Faktoren abhängig, die bereits in den oberen Kapiteln angesprochen wurden. Bei Eisen zeigt ein niedriger pH-Wert, eine stark pH-abhängige Korrosionsgeschwindigkeit. Wohingegen die Abtragsrate zwischen pH-Werte fünf und zehn unabhängig sind und im stark alkalischen Bereich Eisen sogar passiv ist (Abb. 27) [90, 91].

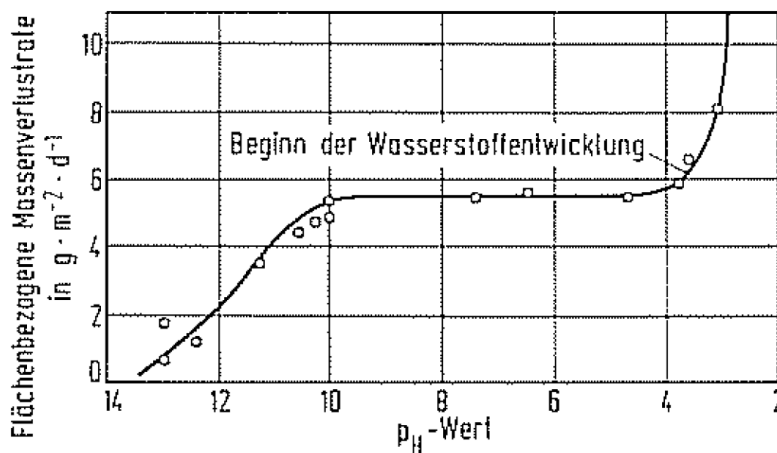
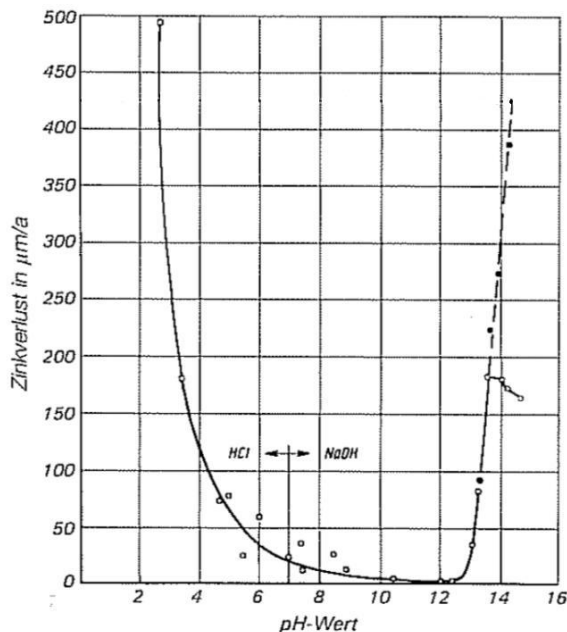


Abb. 27 pH-Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit von unlegierten Stahl [90]

Im sauren Bereich ( $\text{pH} < 5$ ) läuft die Korrosion von Eisen unter Wasserstoffentwicklung ab, was eine erhöhte Korrosionsgeschwindigkeit zur Folge hat. Die Korrosion von Eisen im neutralen und leicht basischen Bereich ( $5 < \text{pH-Wert} < 10$ ) wird durch die Sauerstoffkorrosion bestimmt. Hierbei haben die Temperatur, die Sauerstoffkonzentration und die Strömungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit. Im alkalischen Bereich ( $\text{pH} > 10$ ) sind Eisen und unlegierte Stähle passiv und die Korrosionsraten sehr niedrig [91].

Anders wirkt sich der pH-Wert bei Zink aus. Zink ist nur zwischen  $7 \leq \text{pH} \leq 12$  ausreichend korrosionsbeständig. Es kann sich hierbei eine Deckschicht aus Zinkhydroxid ausbilden, die sich in Zinkoxid umwandelt. In stark alkalischen und sauren Bereichen zeigt Zink eine schlechte Korrosionsbeständigkeit und weist hohe Korrosionsgeschwindigkeiten auf, da sich keine Passivschicht bilden kann. Darum ist eine Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit von Zink und Zinklegierungen ohne das Korrosions-pH-Wert-Diagramm (Abb. 28) nicht möglich [92].



**Abb. 28** Korrosionsverlust von Zink in Abhängigkeit vom pH-Wert einer belüfteten wässrigen Lösung bei  $30^\circ\text{C}$  [92]

### 2.7.3.5 Sauerstoffgehalt

Der Sauerstoffgehalt, der die Korrosion beeinflusst ist von der  $\text{O}_2$ -Löslichkeit im Elektrolyten abhängig. Es kann aber auch durch äußere Einflüsse zur Sauerstoffverarmung in Elektrolyten kommen, wobei nicht mehr genug Sauerstoff zur Sauerstoffkorrosion bereitgestellt wird und die Säurekorrosion einsetzt. Sauerstoff ist das an

der Kathode wirkende Oxidationsmittel und nimmt in zweifacher Sicht auf den Korrosionsprozess Einfluss. Der Elektrolyt wird unter anderem durch Sauerstoff zu einem korrosiven Medium und kann unlösliche Korrosionsprodukte (passivierende Wirkung) erzeugen, die die Korrosion verlangsamen können. Es bestehen hier aber Unterschiede zwischen nichtpassivierenden und passivierenden Metallen. Passivierende Metalle benötigen für ihre Passivität ein ausreichendes Angebot an Sauerstoff. Wenn die Passivschicht noch nicht ausgebildet ist, besteht das Risiko der Muldenkorrosion [89].

#### 2.7.3.6 Weitere Umwelteinflussfaktoren

Umwelteinflussfaktoren befinden sich vor allem im Regen und in der Luft und wirken teilweise schädigend aber auch schützend auf Bauteile ein. Luftverunreinigungen lagern sich häufig auf Werkstoffoberflächen ab. Einige Verunreinigungen reagieren mit der Oberfläche und werden dadurch verbraucht. Andere wirken katalytisch. Bei Fahrzeugen kann sich auch Schlamm und Schmutz von der Straße auf Komponenten ablagern.

Die Einflussgrößen können folgende Eigenschaften haben [84]:

- Hygroskopisches Material auf der Oberfläche hält diese länger feucht,
- die Leitfähigkeit der Korrosionsprodukte und der Elektrolytflüssigkeit nimmt zu,
- die Verunreinigungen bilden lösliche Zwischenprodukte oder aktivierte Komplexe, die den Schutzmechanismus oder den Schutzfilm zerstören,
- mit der Senkung des pH-Wertes steigt die Löslichkeit der Korrosionsprodukte.

Bei der atmosphärischen Korrosion wirken für die Korrosion unterstützend  $\text{SO}_2$ , Ruß und Staub mit. Die korrosiven Einflussfaktoren werden hierbei in Land-, Stadt-, Industrie- oder Seeluft unterteilt.

Stickoxide ( $\text{NO}_2$ ) sind anthropogenen Ursprungs und entstehen bei Hochtemperaturverbrennungen. Sie sind noch wenig untersucht und gelten als untergeordnete Einflussgröße. Bei Nitraten im Regenwasser wurde eine beschleunigende Wirkung der Korrosion vor allem bei Zink festgestellt [15].

Im Folgenden wird auf Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), einer der in der Vergangenheit einflussreichsten Umweltfaktoren, eingegangen. Bei der Betrachtung der Schadstoff-

emissionen ist zu erkennen, dass der Gehalt an  $SO_2$  in der Atmosphäre in den letzten 20 Jahren in den Industrienationen stark abgenommen hat. Er entsteht durch den Verbrennungsprozess und wird durch Rauchgasentschwefelungsanlagen herausgefiltert. In China und Russland werden jedoch immer noch hohe Konzentrationen gemessen. Darum wirkt Schwefeldioxid in diesen Regionen immer noch stark auf den Korrosionsprozess ein.

Schwefeldioxid ist der wichtigste Stimulator der atmosphärischen Korrosion. Die Korrosionsrate hängt stark von der  $SO_2$  - Konzentration und der Befeuchtungsdauer mit einem Phasenfilm ab. Im Elektrolytfilm gelöstes Schwefeldioxid depolarisiert bei korrodierenden Metallen den Kathodenprozess der Sauerstoffreaktion und zerstört Polymere. Zudem senkt es den pH-Wert des Elektrolyten und beschleunigt somit die Korrosion.

Die  $SO_2$ -Belastung wird in Kombination mit dem Niederschlag zu einer schwefligen Säure.

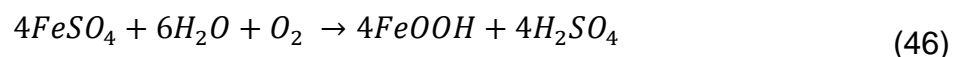
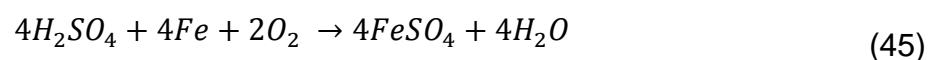


Jedoch wirkt auch die oberflächennahe  $SO_2$ -Belastung korrosiv auf Stahloberflächen. Diese chemische Reaktion durch eine  $SO_2$ -Belastung wird im Folgenden kurz beschrieben.



$SO_2$  wird auf Stahloberflächen adsorbiert und zum Sulfat-Ion oxidiert. Diese Reaktion wird durch Eisenoxide katalysiert. Dabei entsteht ein saurer Elektrolyt durch die Bildung von Schwefelsäure, wobei auch die Ionen-Konzentration im Elektrolyten angehoben wird.

Bei der Eisenauflösung werden dabei Eisensulfate nach der Formel (45) gebildet, die ihrerseits sauer hydrolisieren und den pH-Wert stets relativ klein halten.





Zusammenfassend für Stahl ist festzustellen, dass Schwefelsäure ein aggressives Medium bildet. Es besteht sogar ein synergetischer Effekt zwischen Schwefeldioxidgehalt und periodischer Befeuchtung [93].

Vergleichbare Reaktionen laufen beim Kontakt von Zink mit Schwefelsäure ab.



Der Schwefeldioxidgehalt der Atmosphäre ändert sich mit der Jahreszeit und erreicht in den Wintermonaten ein deutliches Maximum, das meist um das Drei- bis Vierfache höher als in den Sommermonaten ist [94].

Hingegen kann Zink im Gegensatz zu Stahl unter einer CO<sub>2</sub>-Belastung an der Atmosphäre eine Schutzschicht ausbilden, die die Korrosion verzögern kann. Die Oxidation von Zinküberzügen (Deckschichtbildung aus basischem Zinkcarbonat) erfolgt wie in Formel (49) und Abbildung 29.

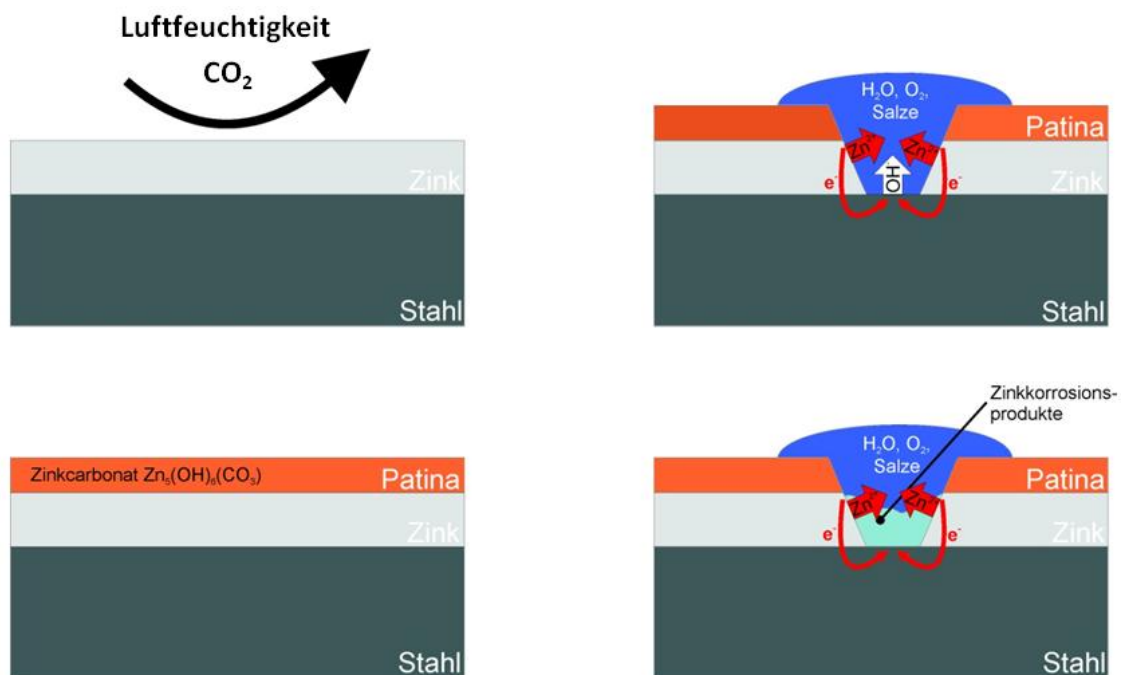
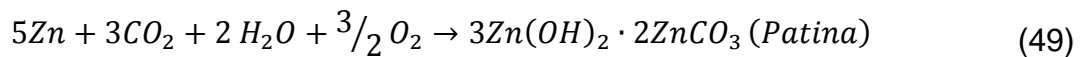


Abb. 29 Mechanismus der Passivierung von Zink

Die Schutzschicht verzögert den Abwitterungsvorgang erheblich, vor allem, wenn der  $\text{ZnCO}_3$ -Anteil größer wird.  $\text{Zn(OH)}_2$  ist ein lose haftender Anteil der Zinkkorrosionsprodukte.

Um den Materialabtrag von Stahl und Zink zu prognostizieren, müssen die erwähnten Einflussfaktoren berücksichtigt und in einem Modell mit den Materialabtragsraten ausgelagerter Proben korreliert werden.

#### 2.7.4 Empirische Materialabtragsmodelle

Um eine Prognose des Materialabtrags zu erstellen, werden die beschriebenen Umwelteinflussgrößen gemessen und mit dem Materialabtrag durch Korrosion korreliert. Diese Modelle werden empirisch nach Auslagerungsversuchen aufgestellt und mit einer Formel für den Abtrag durch Korrosion dargestellt.

Empirische Modelle zur Prognose der Korrosion von unlegiertem Stahl und Zink gibt es bereits seit 40 Jahren. So haben Guttman und Sereda bereits 1968 rechnerische Modelle entwickelt, um die Korrosion mit Hilfe von Auslagerungsversuchen zu bestimmen [95]. In den folgenden Jahren wurden weitere Arbeiten mit Funktionen für Abtragsraten erstellt. Eine gute Zusammenfassung wird von Grondin gegeben [14]. Die Funktionen, die den Materialabtrag berechnen, werden auch „Dose-response Functions“ genannt. Hierbei werden Abtragsraten ermittelt, indem verschiedene Werkstoffe ausgelagert und dabei die Umweltparameter gemessen werden. Vor Versuchsbeginn werden verschiedene Orte der Auslagerung gewählt, an denen unterschiedliche Umweltbedingungen herrschen. Im Anschluss an die Auslagerungsversuche wird der Materialabtrag ermittelt und eine Korrelation zu den Umweltparametern errechnet. Als Ergebnis wird eine Funktion von Einflussgrößen, die den Materialabtrag bestimmen, ausgegeben. Bei den Ermittlungen der Korrosionsraten werden verschiedenste Einflussparameter berücksichtigt, die jeder Autor selbst favorisiert:

- Klimatische Parameter (Temperatur, relative Feuchtigkeit, Dauer der Befeuchtung und Sonneneinstrahlung),
- gasförmige Verunreinigung ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$ ),
- Ablagerungen (Gesamtanzahl, Leitfähigkeit, Konzentration von  $\text{H}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{K}^+$ ).

Im Folgenden soll eine Formel von Lipfert als Beispiel einer Prognose des Materialabtrages vorgestellt werden [96, 97]. Hierbei werden verschiedenste Umwelteinflussparameter einbezogen. Unter anderem wird Feinstaub berücksichtigt, der bei der Verbrennung und bei industriellen Prozessen entsteht und hauptsächlich aus Dieselruß (Verkehr) und Staub (Verbrennung) besteht. Diese Partikel beeinflussen die Korrosion von unlegiertem Stahl und wirken durch die hygroskopische Wirkung korrosionsbeschleunigend, wobei bei Zink kein Einfluss feststellbar war [14, 15]. Im Folgenden werden mögliche Funktionen für Zink und unlegierten Stahl vorgestellt. Nach theoretischen Überlegungen von Einflussfaktoren, werden diese bestimmt, während Versuchsdurchführung gemessen und mit Abtragswerten verglichen. Hierbei sind die Abtragsraten abhängig von der Wasserstoffionenkonzentration, des Schwefeldioxidgehalts der Luft und der Chloridablagerungsrate. Zusätzlich wird der Anteil der relativen Feuchtigkeit über 85% und 90%, die Verschmutzung der Oberfläche und die Niederschlagsrate berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die  $SO_2$ -Konzentration, die Chloridablagerungsrate, die Dauer der Befeuchtung (relative Luftfeuchtigkeit) und die Menge sowie der pH-Wert des Niederschlages einen signifikanten Einfluss auf die Korrosion haben. Zusätzlich wirkt sich abgelagerter Staub auf Stahloberflächen negativ auf die Korrosion aus, wohingegen Niederschlag diese Oberflächen reinigen kann und einen positiven Effekt durch Entfernen von  $SO_2$ ,  $Cl^-$  und Staub von den Oberflächen auf die Korrosion hat. Die folgenden Formeln (50)(51) stellen den Materialabtrag von Stahl und Zink als Funktion von ausgewählten Umwelteinflussgrößen dar.

$$\begin{aligned} \ln(K_{Fe}) = & 5,74 + (0,541 \pm 0,029) \ln(f_{90}t) + (0,257 \pm 0,029) \ln(f_{90}SO_2) \\ & + (0,018 \pm 0,00529) \ln(H^+) + (0,125 \pm 0,023) \ln(Cl^-) \\ & + (0,022 \pm 0,029) \ln(dust) - (0,150 \pm 0,043)precip \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} K_{Zn} = & [t^{0,779} + 0,0456 \ln(H^+)] [4,244 + (0,547 \pm 0,023) f_{85}SO_2 + (0,029 \\ & \pm 0,006)Cl^- + (0,0293 \pm 0,0058)H^+] \end{aligned} \quad (51)$$

$$H^+ = precip \cdot 10^{6-pH} \quad (52)$$

Abkürzung	Beschriebener Parameter	Einheit
$K_{Fe}, K_{Zn}$	Massenverlust Stahl, Zink	$g/m^2$
$f_{85}, f_{90}$	Anteil der Time der relativen Luftfeuchtigkeit über 85, 90%	-
$SO_2$	$SO_2$ Luftkonzentration	$\mu g/m^3$
$H^+$	Wasserstoffionenkonzentration	$meq/(m^2 \cdot y)$
$Cl^-$	Chloridablagerungsrate	$mg/(m^2 \cdot d)$
$dust$	Staubablagerung	$mg/(m^2 \cdot d)$
$precip$	Menge des Niederschlages	$m/y$

**Tabelle 1 Parameter und Einheiten der Formelbestandteile [15]**

Formel (50) und (51) zeigen das Ergebnis von Auslagerungsversuchen. Hierbei werden Materialabtragsraten mit den Umweltparametern korreliert. Auftretende Schwankungen von Abtragswerten werden über Abweichungen in die Formel integriert. Darum werden aus den beiden empirischen Formeln jeweils eine minimale und eine maximale Abtragsrate ausgegeben.

Als Beispiel einer Abtragsfunktion wurden umweltspezifische Daten herangezogen und in die Formel beispielhaft eingesetzt. Hierbei wurde für die Befeuchtungsdauer  $f_{90}$  0,25 und  $f_{85}$  0,4, für die  $SO_2$ -Belastung  $9 \mu g/m^3$ , für die  $H^+$  Belastung wurde ein pH-Wert von 5, für  $precip$  eine Belastung von 1 m/Jahr, für die Chloridbelastung  $1 mg/(m^2 \cdot d)$  und für die Staubbelastung  $5 mg/(m^2 \cdot d)$  angesetzt. Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, zeigen die Abtragsfunktionen einen leicht degressiven Verlauf, der bei Stahl etwas stärker ausgeprägt ist. Die beschriebenen Abtragsfunktionen stellen Werte bei einer statischen Auslagerung dar. Hierbei werden durchschnittliche Abtragstiefen von Stahl errechnet. Lokal können Materialabtragstiefen abweichen und teilweise stark veränderte Werte aufweisen. Abbildung 30 und 31 zeigen statische Materialabtragsraten.

Jedoch können statisch ermittelte Materialabtragsraten nicht direkt auf dynamisch belastete Komponenten von Fahrzeugen übertragen werden, da umweltspezifische Werte stark und schnell variieren können. Dadurch muss die dynamische Belastung der Komponenten durch die Änderung während des Fahrbetriebs berücksichtigt werden. Zusätzlich werden die Komponenten im Winterhalbjahr durch das Streuen von Salzen verstärkt durch Chloride belastet.

Es treten neben dem hier beschriebenen flächigen Korrosionsmechanismus auch weitere Korrosionsarten wie Spannungsrisskorrosion auf, die aber in dieser Arbeit nicht untersucht werden.

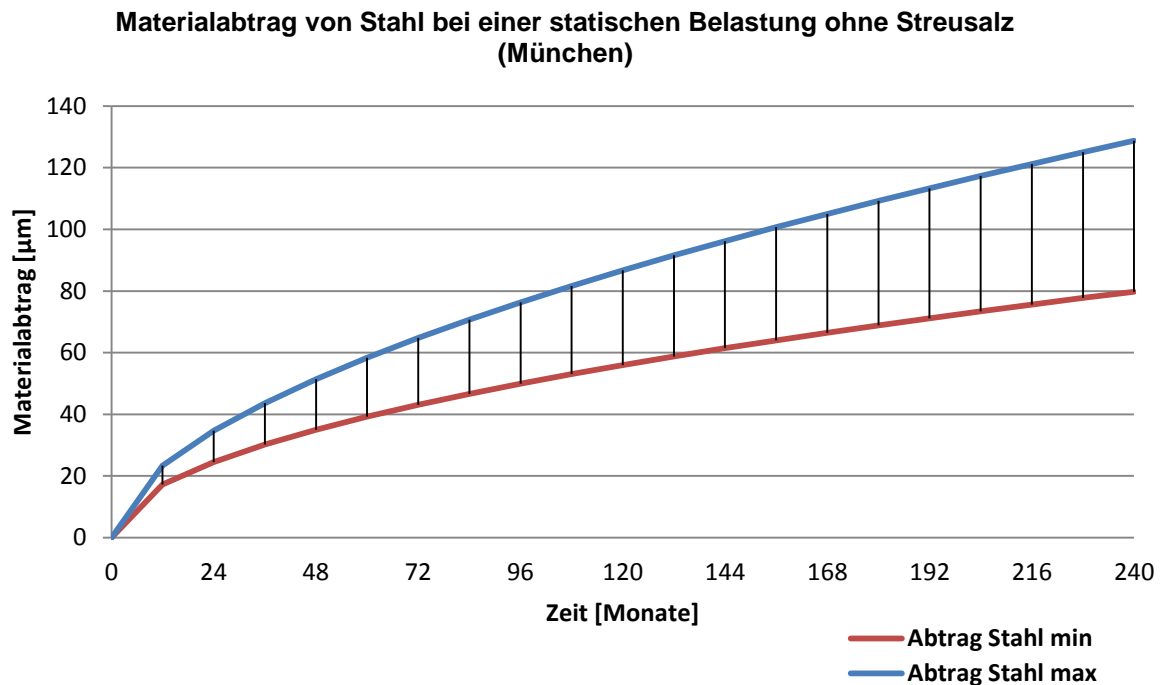


Abb. 30 Prognose der maximalen und minimalen Abtragsraten von Stahl (Beispielregion)

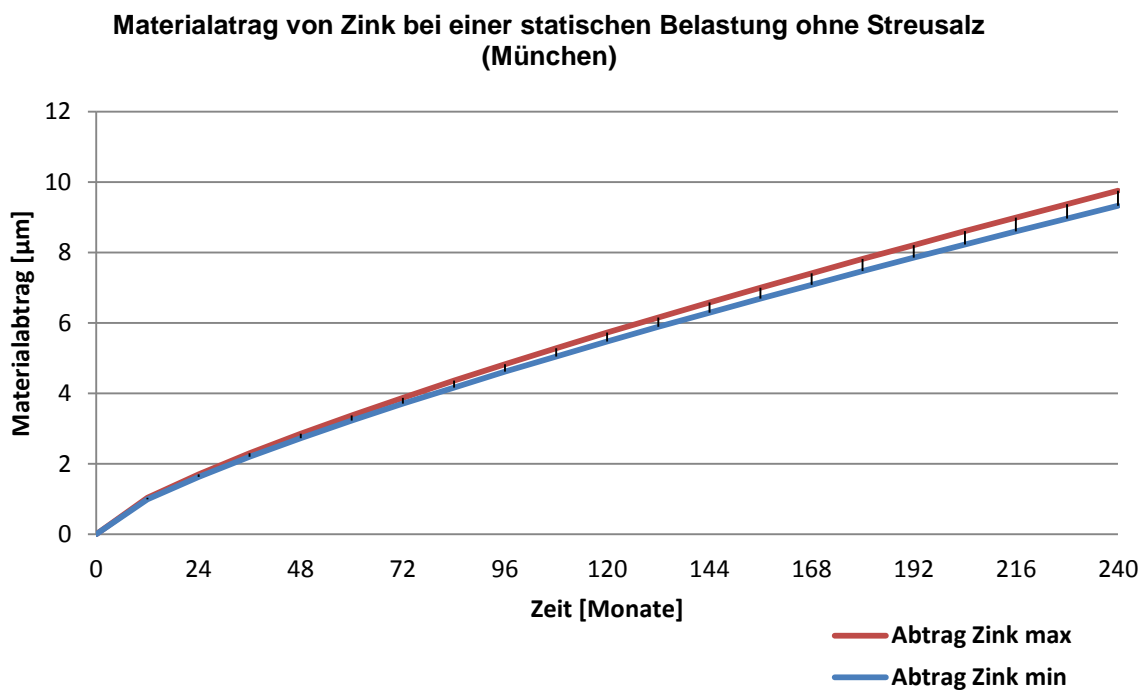


Abb. 31 Prognose der maximalen und minimalen Abtragsraten bei einer statischen Belastung von Zink (München)

### 2.7.5 Spezifische Anforderungen steinschlaggefährdeter Bereiche

Komponenten in steinschlaggefährdeten Bereichen am Fahrzeug haben ein spezifisches Belastungsspektrum. Sie werden vor allem mit Spritzwasser beaufschlagt, können aber durch den Fahrtwind wieder trocknen. Eine Ansammlung an Feuchtigkeit, also ein dauerfeuchtes Klima, kann in diesem Fall (ohne geometrische Einflussfaktoren) ausgeschlossen werden. Geometrische Einflüsse von Komponenten, die eine Wasseransammlung ermöglichen, können jedoch Feuchtigkeit lange halten und ein dauerfeuchtes Klima schaffen. Zusätzlich sind die Belastungen stark länderspezifisch, was durch Schadstoffe auf Straßen verursacht wird. Auch das Fahrverhalten hat einen Einfluss auf die Korrosion, wie zum Beispiel kurze Fahrzyklen, bei denen die Komponenten nicht richtig abtrocknen können und somit lange befeuchtet bleiben. Auch das Abstellen des Fahrzeuges muss berücksichtigt werden, da Garagen eine hohe Luftfeuchtigkeit aufweisen können. Hierbei können durch Reste von Salzablagerungen auf den Komponenten bereits bei geringer Luftfeuchtigkeit Elektrolyte gebildet werden.

## 2.8 Theorie zur thermographischen Detektion von Steinschlagschädigungen und Korrosion

Aktuelle Prüfmethode wie sie in der Industrie Anwendung finden, haben nur eine schlechte Reproduzierbarkeit und ermöglichen meist nur eine subjektive Bewertung der Steinschlagbeständigkeit und des Korrosionsfortschrittes von Proben.

Es wird vor allem die Methode der visuellen Begutachtung von Oberflächen nach einer Steinschlagprüfung unter Verwendung von Referenzbildern angewendet [20]. Die Abstufung der Referenzbilder wird hierbei in zehn Stufen vorgenommen und Zwischenstufen sollen abgeschätzt werden. Bei dieser Bewertung nimmt der Prüfer eine subjektive Analyse vor, die starke Abweichungen verursacht. Es können hierbei nur an der Oberfläche sichtbare Defekte abgeschätzt werden. Neuere Methoden der digitalen Bildauswertung untersuchen Oberflächen mit Hilfe von Fotos oder Scans unter Verwendung unterschiedlicher Grautöne. Hierbei kann bei Schichtverlust die nun an der Oberfläche sichtbare, neue Schicht durch einen anderen Grauwert angezeigt werden. Diese Methode ermöglicht eine objektivere Bewertung des Schadens, kann aber nur den Fall des Schichtverlusts analysieren. Elektrochemische Mess-

Methoden wie die Elektrochemische Impedanz Spektroskopie (EIS) ist eine sehr sensitive Methode für die Detektion und die Bestimmung von Adhäsionsverlust der Metall/Polymer Phasengrenze [98, 99, 100].

Hierbei wird die Impedanz, also der Wechselstromwiderstand, der Elektrode bei geringer Wechselspannungsamplitude über einen weiten Frequenzbereich gemessen. Delamination und vollständiger Schichtverlust können aus dem Frequenzgang des Phasenwinkels und des Betrags der Impedanz ermittelt werden.

Hierbei können korrosionsinduzierende Defekte ermittelt werden, jedoch kann dieser Wert keinem definierten Defekt zugeordnet werden, da ein Durchschnittswert der Fläche gemessen wird [101, 102].

Darum kann EIS nicht für Multisteinschlagprüfungen, wie sie in der Automobilindustrie Anwendung finden, genutzt werden, da eine Vielzahl von Defekten auf einmal in das Beschichtungssystem eingebracht wird. Auch benötigt diese Messmethode viel Zeit und kann nur eine kleine Oberfläche analysieren. Durch diese Messmethoden hat es zwar eine Verbesserung der Bewertung gegeben [7, 98], jedoch sind diese nicht ausreichend, um alle Defekte einer Oberfläche zu charakterisieren. Um die Beschädigungsmechanismen richtig zu verstehen und objektiv zu bewerten, ist es nötig, neue Untersuchungsmethoden zu erproben. Im Folgenden wird die Theorie zur Detektion von thermischen Wellen, die an Defekten reflektieren, mit der Puls-Phasen-Thermographie näher beschrieben. Die Puls-Phasen-Thermographie ist eine Methode in der die Vorteile der Puls-Thermographie und der Lockin-Thermographie vereint werden [103]. Der Vorteil der Puls-Thermographie ist die schnelle Anregung durch Blitzlampen. In Kombination mit der Lockin-Thermographie kann nicht nur die Amplitude untersucht werden, sondern ebenfalls die Phasenverschiebung reflektierter thermischer Wellen analysiert werden.

Bei der Puls-Phasen-Thermographie werden die zu untersuchenden Oberflächen mit einem Blitzlicht beaufschlagt. Diese Energie wird mit Xenon Lampen in Form eines Rechteck-Impulses aufgebracht [104]. Hierbei entsteht eine Wärmediffusion durch das Material und eine thermische Wellenfront bildet sich aus (Abb. 32) [105].

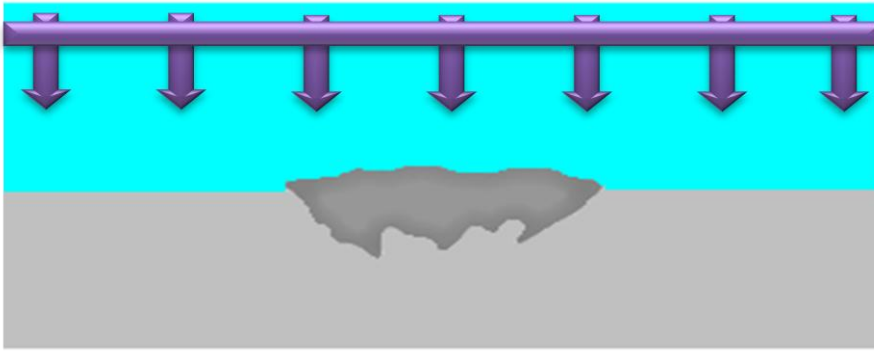


Abb. 32 Ausbildung einer thermischen Wellenfront in einer Polymerbeschichtung

Diese thermischen Wellen werden an Grenzflächen teilweise reflektiert (Abb. 33) [106]. Die Reflektionsrate ist abhängig von der Effusivität der Schichten, die von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Dichte des Materials  $\rho$  und der Wärmekapazität  $c$  des Materials abhängig ist [107].

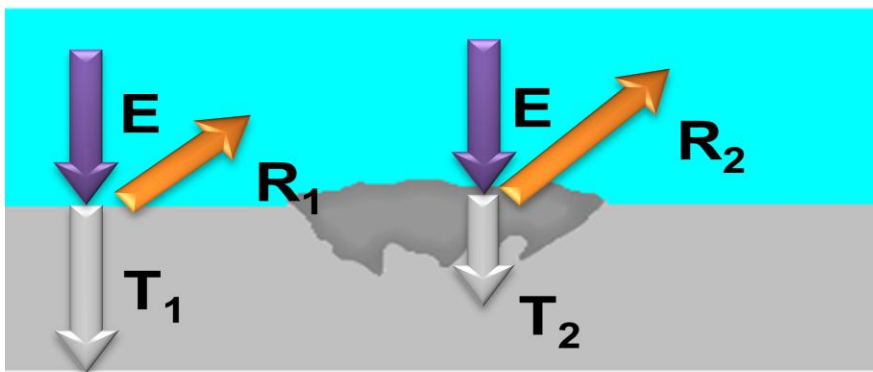


Abb. 33 Reflexion thermischer Wellen an Grenzflächen

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (53)$$

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (54)$$

Reflektierte thermische Wellen können an der Oberfläche von einer IR-Kamera in einer Sequenz aufgenommen werden. Diese Daten bestehen aus einer N-Elemente 3-D Matrix mit den horizontalen und vertikalen Koordinaten  $x$  und  $y$  und der  $z$  Koordinate, die von der zeitlichen Entwicklung abhängig ist. Die zeitabhängige thermische Antwort wird rekonstruiert und mit der Fouriertransformation in den benötigten Frequenzbereich überführt [108].



$$F_n(x, y) = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \cdot e^{i \cdot 2\pi \cdot k \cdot \frac{n}{N}} = \text{Re}(F_n) + i \cdot \text{Im}(F_n) \quad (55)$$

Mit der imaginären Zahl  $i$ , dem Inkrement der Frequenz  $n$  ( $n = 1, 2, N/2$ ) und dem finiten Bereich  $N$  ( $0 \leq n \leq N - 1$ ) kann die inverse diskrete Fouriertransformation jeder Frequenz berechnet werden [109].  $\text{Re}(F_n)$  und  $\text{Im}(F_n)$  stellen den realen und den imaginären Teil der Transformation dar, mit dem die Phase  $\Phi(x, y)$  und die Amplitude  $A_n(x, y)$  berechnet werden können.

$$\Phi_n = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F_n(x, y))}{\text{Re}(F_n(x, y))}\right) \quad (56)$$

$$A_n = \sqrt{\{\text{Re}(F_n(x, y))\}^2 + \{\text{Im}(F_n(x, y))\}^2} \quad (57)$$

Die Werte der Phasenverschiebung und der Amplitude zeigen die zeitabhängige thermische Antwort der Probe. Die Entwicklung der Phasenverschiebung ist unempfindlich gegen Störgrößen wie inhomogene Beleuchtung, da die Phasenverzögerung und nicht absolute Temperaturen gemessen werden [110].

Diese Phasenverzögerung und die zeitliche Temperaturveränderung werden durch die Reflektion der thermischen Welle an Grenzflächen stark beeinflusst. Erst der Effekt des thermischen Kontaktwiderstandes [111], der wichtigste Faktor bei der photothermischen Radiometrie [112-114], der es ermöglicht Adhäsionsprobleme von Beschichtungen auf Substraten zu untersuchen [115, 116], verursacht eine Phasenverschiebung von reflektierten und transmittierten thermischen Wellen an Grenzflächen.

Die Methode der Puls-Phasen-Thermographie wird bereits in unterschiedlichen Forschungsbereichen genutzt. Vor allem bei Untersuchungen von CFK-Werkstücken wird bereits die Methode der Puls-Phasen-Thermographie genutzt. Hierbei können durch den oben Beschriebenen Wärmefluss Fehlstellen bei Fasern detektiert werden. Diese können mittels Amplituden- und Phasenwerten klassifiziert werden, da thermische Wellen durch ihre örtliche und zeitliche Temperaturmodulation analysiert werden können. Differenzen von Amplitude und Phase können durch die Reflektion thermischer Wellen an (thermischen) Grenzflächen detektiert werden [116].

Mit der Puls-Phasen-Thermographie können Defekte lateral und in die Tiefe untersucht werden. Hierbei ist die Mögliche Tiefe zu untersuchender Bauteile durch die materialspezifische thermische Eindringtiefe  $\mu$  begrenzt [117]:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (58)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (59)$$

$\alpha$  Temperaturleitfähigkeit

$\omega$  Kreisfrequenz

$f$  Modulationsfrequenz

Die laterale Auflösung des Kamerasystems kann durch Objektiv gesteuert werden. Hierbei können laterale Auflösungen bis zu wenigen  $\mu\text{m}$  erreicht werden. Jedoch können nur die thermisch reflektierten Wellen an der Oberfläche detektiert werden. Befinden sich diese Defekte tiefer im Material, so wird das Signal an der Oberfläche streuen und unscharf werden. Bei Defekten in tieferen Regionen wird sich die Lockin-Thermographie besser eignen, da mit einer spezifischen Frequenz angeregt werden kann, um definierte Tiefen zu untersuchen.

## 2.9 Weiteres Vorgehen durch fehlenden Stand der Technik

Aktuell besteht keine Möglichkeit den Steinbewurf von Fahrzeugen zu simulieren, da die Mechanismen der Steinmitnahme durch den Reifen noch nicht untersucht wurden. Um eine computerbasierte Simulation zu generieren ist es nötig die Steinmitnahme, den Steinabwurf, die Steinflugbahn und den Steinaufprall zu analysieren und Modelle von Trajektorien zu erstellen.

Aufprallende Steine verursachen Schäden an Beschichtungssystemen, die meist mit visuellen Methoden bewertet werden. Um eine objektive Bewertungsmethode zu erarbeiten wird die Puls-Phasen-Thermographie analysiert, die bereits in anderen Bereichen wie bei der Untersuchung von Faserverbundwerkstoffen genutzt wird.

In der Literatur bestehen bereits weitreichende statische Materialabtragsmodelle durch Korrosion. Diese durch Korrelation mit Umweltdaten erstellten Modelle können jedoch nicht auf dynamisch belastete Komponenten von Fahrzeugen angewendet werden. Darum soll der Materialabtrag dynamisch korrosiv belasteter Komponenten mit einer hohen Belastung durch Streusalz und Splitt am Fahrzeug untersucht werden und ein Prognosemodell des Materialabtrags erstellt werden.

### 3 Experimentelles

Um eine computerbasierte Simulation des Steinbewurfs von Fahrzeugen zu erstellen, werden folgende drei Schwerpunkte experimentell ermittelt.

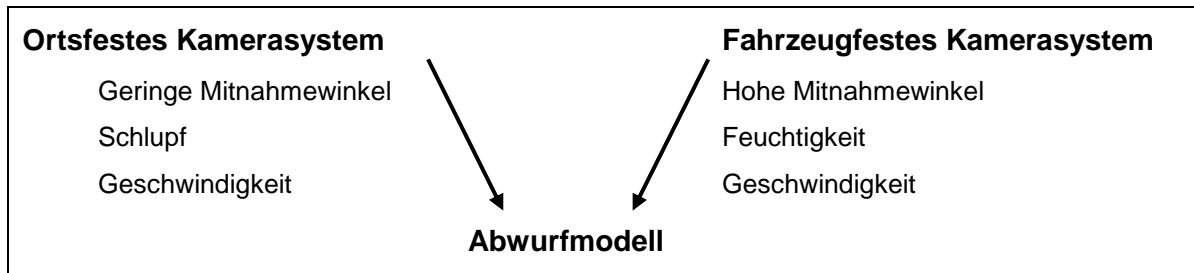
- Flugbahnen von abgeworfenen Steinen,
- Auf- und Rückprallverhalten von Steinen an Fahrzeugkomponenten.

Zur Verbesserung der Analysequalität wird die Puls-Phasen-Thermographie für das Anwendungsgebiet der Detektion und Bewertung von Steinschlagbeschädigungen und des Korrosionsfortschrittes untersucht. Hierbei werden thermische Rückmeldungen von Defekten mit Oberflächen- und Schlibbildanalysen korreliert. Um eine Prognose des Korrosionsfortschrittes an Steinschlagdefekten zu erarbeiten, werden folgende Schwerpunkte experimentell ermittelt:

- Induzierte Beschädigungen durch Steinschlag an Beschichtungssystemen,
- Analyse des Korrosionsfortschrittes an Steinschlagdefekten von Proben aus Korrosionswechselltests,
- Bestimmung des Materialabtrages durch Korrosion von Fahrwerkskomponenten aus dem Feld.

#### 3.1 Analyse des Steinbewurfs von Fahrzeugen

Um die Steinaufnahme und den Steinabwurf am Reifen zu untersuchen, werden Fahrversuche auf präparierten Strecken unter definierten Bedingungen durchgeführt. Hochgeschwindigkeitskameras zeichnen die Flugbahnen abgeworfener Steine auf und ermöglichen eine kinematische Untersuchung der Abwurfparameter sowie der Bahnkurve. Durch die Dynamik des Fahrzeuges werden Steinflugbahnen in zwei unterschiedlichen Kamerasystemen aufgenommen. Ein ortsfestes Kamerasystem ermöglicht eine Dokumentation von Steinflugbahnen im Inertialsystem. Mit diesem Aufbau können vor allem Steine mit kurzen Haftzeiten und geringen Mitnahmewinkeln analysiert werden. Um Flugbahnen von Steinen mit längeren Haftzeiten am Reifen zu untersuchen, wird ein fahrzeugfestes Kamerasystem genutzt, das für einen längeren Zeitraum Steine im Radhaus aufzeichnen kann.



### Untersuchungen spezifischer Einflussgrößen des Steinabwurfes

#### 3.1.1 Flugbahnanalysen mit einem ortsfesten Kamerasystem

Um die Häufigkeit von Steinabwürfen, die Abwurfposition und -richtung sowie die Fluggeschwindigkeit zu ermitteln, wurden Fahrversuche auf einer Teststrecke (Abb. 34) bei Raumtemperatur ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) durchgeführt.



**Abb. 34 Beschleunigungsstrecke (links) und Glasboden (rechts)**

Durch eine Positionierung von Hochgeschwindigkeitskameras und eines Beleuchtungssystems neben und unter der Teststrecke (Fahrbahnabschnitt aus einer Glas- und einer Plexiglasscheibe (Opferscheibe)) können Steinflugbahnen im Inertialsystem in allen Raumkoordinaten aufgezeichnet werden (Abb. 35). Auf dem transparenten Fahrbahnabschnitt wurde Splitt (Durchmesser 2-7mm) mit einer Streudichte von  $200 \text{ g/m}^2$  über einer Fläche von  $100 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  homogen verteilt. Optimale Aufnahmen von Steinflugbahnen konnten mit Belichtungszeiten von  $100 \mu\text{s}$  (seitliche Kameraposition) und  $200 \mu\text{s}$  (untere Kameraposition) bei 1000 Bildern pro Sekunde und einer Auflösung von  $1504 \times 1128$  erreicht werden. Um die Steine vollständig auszu-leuchten, wurden zehn Strahler (seitlich vier Strahler, unten sechs Strahler) mit jeweils 4 kW Leistung positioniert, die während der Überfahrt des Fahrzeuges noch

auf 8 kW Leistung geboostet wurden und eine gesamte Lichtstärke von zirka 400.000 Lux erzeugen.



**Abb. 35 Aufbau des seitlichen (links) und des unteren (rechts) Kamera- und Beleuchtungssystems**

Bei Versuchsdurchführung wurde das Fahrzeug mit dem Gewicht von 925 kg auf der Vorderachse und 1000 kg auf der angetriebenen Hinterachse auf die Prüfgeschwindigkeit beschleunigt (Maximalgeschwindigkeit 80 km/h), die zusätzlich mit einer Lichtschranke gemessen wurde. Vor der Überfahrt der aufbereiteten splittbedeckten Strecke wurde durch einen Trigger das Kamera- und Beleuchtungssystem durch das Vorderrad gestartet. Für die Versuchsdurchführung wurden neue Reifen eines Wintermodells von Continental (ContiWinterContact™ TS 810 Sport (225/45)) verwendet.

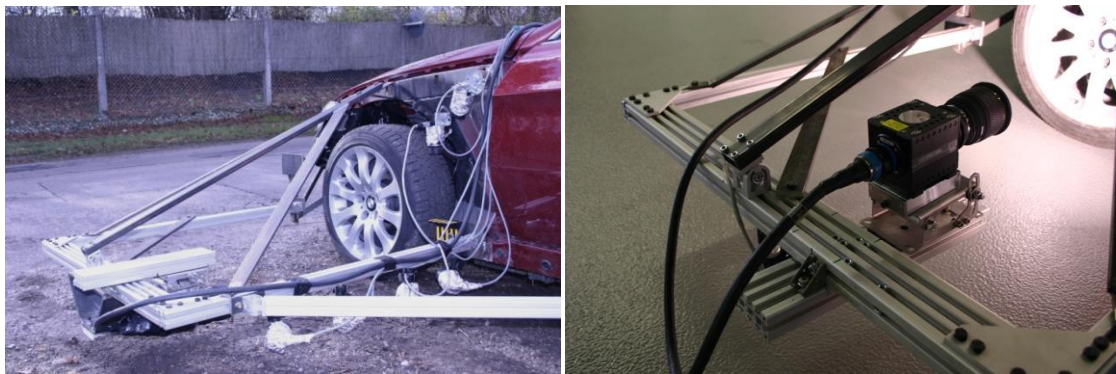
Die erste Versuchsreihe wurde mit nicht beschleunigten Rädern bei konstanten Geschwindigkeiten von 30 km/h, 50 km/h und 80 km/h durchgeführt, um den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Steinabwurf von Rädern zu untersuchen.

Um den Einfluss des Schlupfes von Rädern auf den Abwurf zu ermitteln, wurde eine zweite Versuchsreihe mit gebremsten und beschleunigten Rädern auf der splittbedeckten Fahrbahn durchgeführt.

Die Aufnahmen wurden mit dem Programm „Falcon eXtra5.05“ ausgewertet. Hierbei konnten die Flugbahnen automatisch oder durch manuelle Markierungen der Steine verfolgt und eine Bahnkurve ermittelt werden.

### 3.1.2 Flugbahnanalysen mit einem fahrzeugfesten Kamerasystem

Steine mit längeren Haftzeiten an der Bereifung wurden mit einem fahrzeugfesten Kamerasystem aufgezeichnet, das über eine Haltevorrichtung für eine Hochgeschwindigkeitskamera direkt am Fahrzeug (Distanz 1 m) angebracht wurde (Abb. 36). Dieses Kamerasystem ermöglicht eine Aufzeichnung des Steinbewurfes im Radhaus von 10 Sekunden (begrenzt durch die Speicherkapazität) und ermöglicht eine Analyse von Steinflugbahnen mit hohen Mitnahmewinkeln.



**Abb. 36** Aufbau der Haltevorrichtung für das Kamera- und Beleuchtungssystem

Fahrversuche werden auf einer asphaltierten Strecke (250 m) bei Temperatur von  $20^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$  mit einer Streudichte von  $200 \pm 30\text{g}$  durchgeführt. Für die Aufnahmen wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Auflösung von  $1280 \times 960$  Pixeln und einer Geschwindigkeit von 1000 Bildern pro Sekunde verwendet. Die Belichtungszeit der Kamera hatte ein Optimum bei  $200 \mu\text{s}$  unter der Nutzung von sechs Halogenscheinwerfern für die Beleuchtung. Das Fahrzeug und die Bereifung der Versuchsreihe entsprechen dem Modell aus 3.1.1. Die Streckenpräparation wurde von einem Streu- und einem Bewässerungswagen vorgenommen, die für gleichmäßige Testbedingungen gesorgt haben.

Es wurde eine Testreihe bei trockener Fahrbahn mit Geschwindigkeiten von 30 km/h, 50 km/h und 80 km/h durchgeführt, um die Anzahl und Abwurfparameter verhakter Steine im Profil zu untersuchen.

Zusätzlich wurde eine Versuchsreihe bei nassen Straßenbedingungen durchgeführt, um den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Steinmitnahme zu untersuchen.

### 3.1.3 Steinschlaganalyse an der Hinterachse

Um die Steinschlaghäufigkeit und -intensität aufprallender Steine an der Hinterachse zu untersuchen, wurden Haltevorrichtungen konzipiert, die am Sturzlenker und am Hinterachsträger befestigt wurden (Abb. 37). Mit diesem Aufbau wurden Fahrversuche auf der Versuchsstrecke aus 3.1.2 unter gleichen Bedingungen durchgeführt.



**Abb. 37: Probebleche befestigt am Sturzlenker und am Hinterachsträger**

Befestigte Bleche decken während der Versuchsdurchführung steinschlagbelastete Bereiche ab und ermöglichen somit eine Analyse der Steinschlaghäufigkeit und -intensität unter spezifischen Fahrbedingungen. Seitliche Proben mit einer Probenfläche von 32 cm x 16 cm wurden mit einem Abstand von 5 cm zum Rad und 10 cm zur Fahrbahn angebracht. Mittig positionierte Proben an der Hinterachse wurden ebenfalls mit einem Abstand von 10 cm zur Fahrbahn und einer Probengeometrie von 28 cm x 22 cm angebracht.

Durch den Längslenker und das Hinterachsgetriebegehäuse verdeckte Bereiche der Probenfläche werden nicht in die Auswertung einbezogen. Aus diesen Gründen berechnet sich die effektive Probenfläche an der mittleren Probe zu 364 cm<sup>2</sup> und an den seitlichen Proben zu 472 cm<sup>2</sup>. Diese Probebleche aus unlegiertem Stahl und

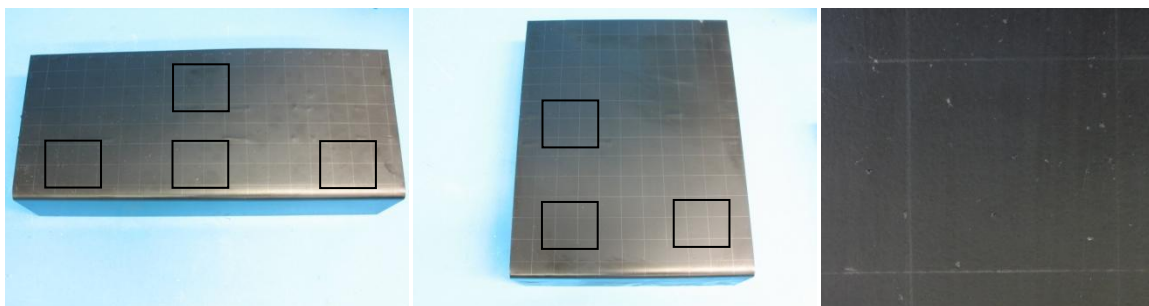
einer KTL-Beschichtung mit einer Schichtdicke von  $25 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$  wurden speziell für die Versuchsdurchführung angefertigt und ermöglichen eine Beurteilung von Steinschlägen selbst bei geringen Aufprallimpulsen.

Um den Einfluss der Feuchtigkeit, der Geschwindigkeit und des Lenkwinkels einschlagener Räder zu untersuchen, wurden drei Versuchsreihen durchgeführt.

Die erste Versuchsreihe wurde auf trockener Fahrbahn mit den Geschwindigkeiten 30 km/h, 50 km/h und 80 km/h durchgeführt, um die Anzahl und die Aufprallintensität von Steinen zu analysieren. Eine zweite Versuchsreihe mit der gleichen Geschwindigkeitsvariation wurde auf nasser Fahrbahn durchgeführt, um den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Steinschlaghäufigkeit und Abweichungen der Steinschlagintensität im Vergleich zu trockenen Bedingungen zu ermitteln.

Um den Einfluss eingelenkter Räder auf den Steinbewurf der Hinterachse zu ermitteln, wurde eine dritte Versuchsreihe bei trockenen Bedingungen mit Geschwindigkeiten von 50 km/h und 80 km/h in einer Kurve durchgeführt.

Nach den Versuchsreihen werden die Oberflächen der Proben inspiziert, in 20 mm x 20 mm große Quadrate aufgeteilt und die Steinschläge pro Fläche ermittelt (Abb. 38). Die Steinschlagintensität wurde mit Hilfe eines 3D-Oberflächenmesstools an definierten Bereichen der Probe untersucht und die Beschädigungsintensität analysiert.

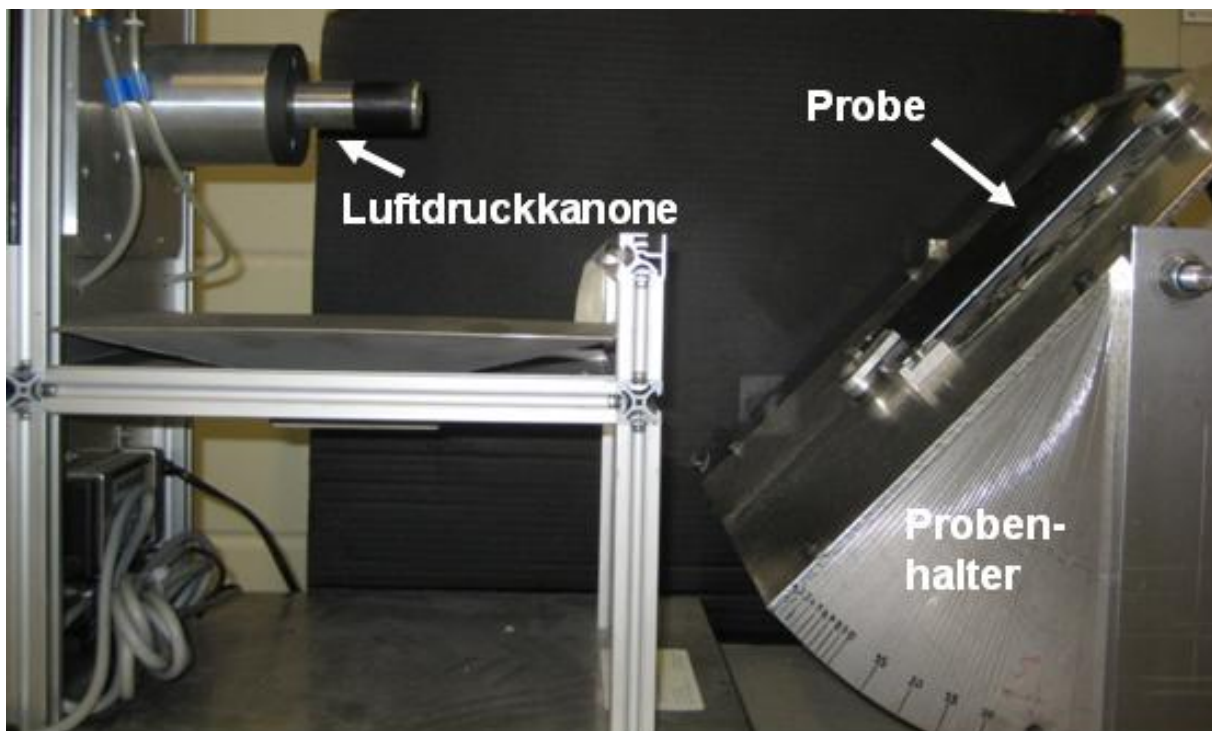


**Abb. 38** Aufteilung der Probebleche in Quadrate und Markierung der Messstellen (schwarzer Rahmen) von Bereichen, an denen eine 3D-Oberflächenmessung vorgenommen wurde



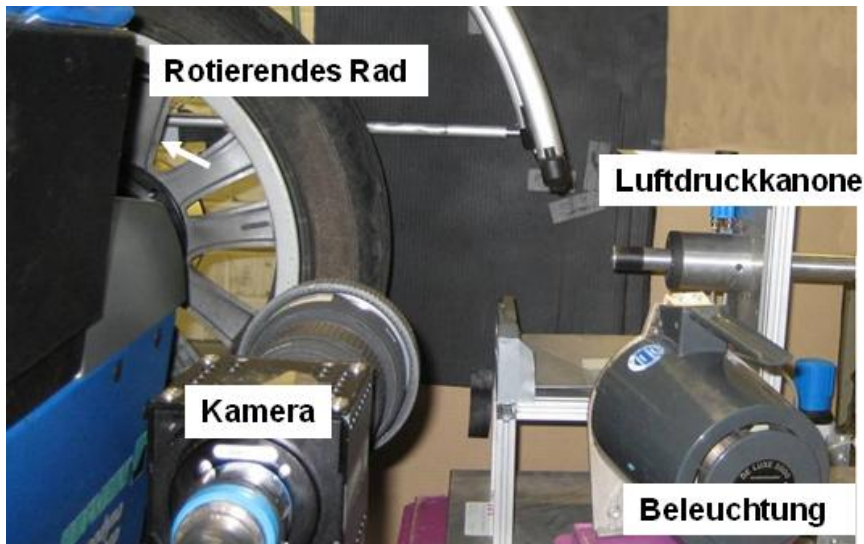
### 3.2 Laboruntersuchung des Restitutionskoeffizienten

Wie bereits in Abschnitt 2.4 dargelegt, lässt sich die Stoßzahl eines Materials mit den Auf- und Rückprallgeschwindigkeiten und deren Ein- sowie Ausfallswinkeln bestimmen. Diese im Labor durchgeführten Untersuchungen werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (aus 3.1.2) aufgezeichnet und sollen das Rückprallverhalten von Steinen an typischen Materialien von Fahrzeugkomponenten im Laborversuch nachstellen. Der Versuchsaufbau wurde so konzipiert, dass ein Projektil mit einer Luftdruckkanone auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt werden kann. Das Target mit der Fläche 200 mm x 100 mm ist hierbei auf einem dafür konstruierten, neigbaren Probenhalter befestigt (Abb. 39).



**Abb. 39 Versuchsanordnung der Luftdruckkanone und des neigbaren Probenhalters**

Zusätzlich wurde ein rotierendes Rad beschossen, um den Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit auf das Rückprallverhalten zu untersuchen (Abb. 40).



**Abb. 40 Versuchsanordnung der Luftdruckkanone und des eingespannten, drehenden Rades**

Die Flugbahnen der Projektile wurden mit einem Kamerasystem (aus 3.1.2) und einer Beleuchtung von 2000 W bei Raumtemperatur  $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  untersucht.

Zur reproduzierbaren Ermittlung der normalen und tangentialen Restitutionskoeffizienten wurde eine Keramikkugel ( $\text{ZrO}_2$ , Dichte  $5,7 - 6 \text{ g/cm}^3$ , E-Modul  $150-210 \text{ kN/mm}^2$  nach DIN EN 60 672 mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Masse von 0,68g verwendet, um eine Streuung durch die Steingeometrie zu unterbinden.  $\text{ZrO}_2$  hat die doppelte Dichte im Vergleich zu Basalt und Dolomit, jedoch eignet sich das Material durch seine hohe Bruchfestigkeit. Vorversuche haben vergleichbare Ergebnisse des Restitutionskoeffizienten von der Keramikkugel und Splitt ergeben. Um den Einfluss der Geometrie auf das Streuverhalten zu untersuchen, wurde scharfkantiger Splitt mit einer Masse von  $0,27 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$  verwendet.

Als Target wurden Materialien von Bauteilen untersucht, die im direkten Steinbewurf am Fahrzeug positioniert sind. Direkt vom Steineigenbewurf eines Fahrzeuges sind vor allem das Radhaus, der Reifen und die Hinterachse betroffen. Zusätzlich wurde Asphalt untersucht, da Steine von Komponenten auf die Fahrbahn rückprallen können.

Folgende Target-Materialien wurden verwendet:

- Flachnadelvlies (Polyethersulfon-Polypropylen) der Radhausschale,
- Kunststoff (Polypropylen-Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) als zweite Variante der Radhausschale,
- unlegiertes Stahlblech mit 2mm Dicke (Fahrwerkskomponenten),
- Asphalt,
- Gummi (Reifen des Fahrzeuges).

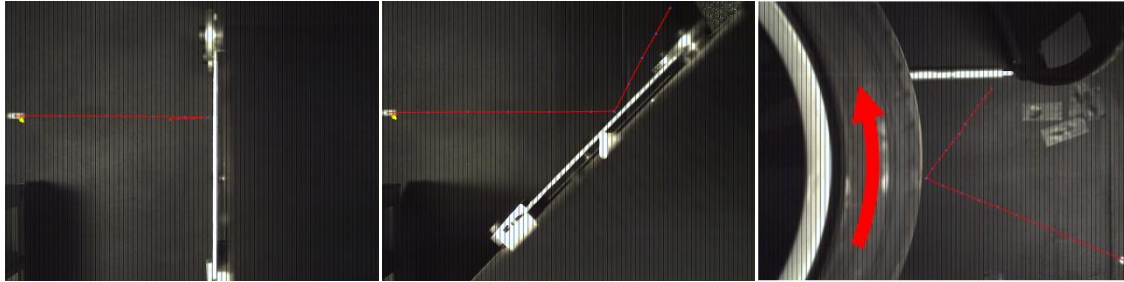
Um den geschwindigkeitsabhängigen normalen Restitutionskoeffizienten, den tangentialen Restitutionskoeffizienten und das Streufeld durch geometrische Einflussfaktoren von Splitt zu untersuchen, wurden drei Versuchsreihen durchgeführt (Abb. 41).

Zur Ermittlung der normalen Restitutionskoeffizienten der Materialproben wurden die Targets mit einem senkrechtem-Aufprallwinkel und einer Geschwindigkeit zwischen 3 m/s und 60 m/s beschossen. Durch die aufgezeichneten Flugbahnen vor und nach dem Stoß können die normalen Geschwindigkeiten zur Probenoberfläche in ein Verhältnis gesetzt werden, um so den normalen Restitutionskoeffizienten zu ermitteln.

Der tangentielle Restitutionskoeffizient wurde durch die Variation des Aufprallwinkels von 15°, 45° und 90° bei konstanter Geschwindigkeit von  $10 \pm 2$  m/s ermittelt. Das Verhältnis der gemessenen tangentialen Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß ergibt den tangentialen Restitutionskoeffizienten.

Um den geometrischen Einfluss von Splitt auf den Stoß zu untersuchen, wurde zusätzlich scharfkantiger Splitt als Projektil eingesetzt. Um das Streufeld (Variation der Rückprallwinkel) der Splittsteine zu ermitteln, wurde die Flugbahn der Steine vor und nach dem Stoß aufgezeichnet und Winkelfelder des Steinrückpralls ermittelt.

Die Ermittlung des Einflusses eines drehenden Rades (Umfangsgeschwindigkeit 6,6 m/s) auf aufprallende Körper wurde mit einem eingespannten Rad realisiert. Projektile wurden mit einer Geschwindigkeit von  $6,5 \pm 1$  m/s und einer Variation des Aufprallwinkels von 60°, 90° und 120° entgegen und mit der Radlaufrichtung auf den drehenden Reifen beschleunigt. Aus diesen Untersuchungen wurde der normale und tangentielle Restitutionskoeffizient ermittelt, der durch den Einfluss eines drehenden Rades entsteht. Zusätzlich wurde der Einfluss der Steingeometrie untersucht, um Streufelder rückprallender Steine zu ermitteln.



**Abb. 41: Versuchsanordnungen der Messung des normalen (links) und des tangentialen (Mitte) Restitutionskoeffizienten an Probeblechen und am drehenden Reifen (rechts)**

### 3.3 Analyse von Beschädigungen und induzierter Korrosion mittels Puls-Phasen-Thermographie

Um die Bewertung von Steinschlagbeschädigungen und des Korrosionsfortschrittes von beschichteten Substraten zu objektivieren und eine bessere Aussagequalität der Ergebnisse im Vergleich zu optischen, digitalen und elektrochemischen Analysemethoden zu generieren, wurde die Puls-Phasen-Thermographie für das Einsatzgebiet untersucht. Hierbei wurden thermische Rückmeldungen von Beschädigungen unterschiedlicher Beschichtungssysteme und des Korrosionsfortschritts mit physikalischen Defekten mittels Oberflächen- und Schliffbildanalysen korreliert.

#### 3.3.1 Proben

Um unterschiedliche Defekte von Beschichtungssystemen zu untersuchen, wurden Mono- und Multischichtsysteme für die Versuchsreihen auf unterschiedlichen Substraten aufgebracht. Monoschichtsysteme wurden in Form einer schwarzen KTL-Beschichtung ( $25 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ ) auf unlegierte Stahlsubstrate aufgebracht. Multischichtsysteme aus einer KTL-Schicht ( $25 \mu\text{m}$ ), Füller ( $25 \mu\text{m}$ ), Basislack ( $20 \mu\text{m}$ ) und einem Klarlack ( $65 \mu\text{m}$ ) wurden in der Farbe „titansilber metallic“ auf verzinkten Stahl und in der Farbe „schwarz uni“ auf Aluminium appliziert.

Um die Haftungen der Schicht herunterzusetzen und definierte Delaminationen zu erzeugen, wurde zusätzlich das Aluminiumsubstrat doppelt mit dem oben genannten Aufbau beschichtet. Zusätzlich wurden Multischichtsystem mit einem Primer ( $5 \mu\text{m}$ ), Basislack ( $15 \mu\text{m}$ ) und Klarlack ( $25 \mu\text{m}$ ) auf beflamten Polypropylen untersucht.

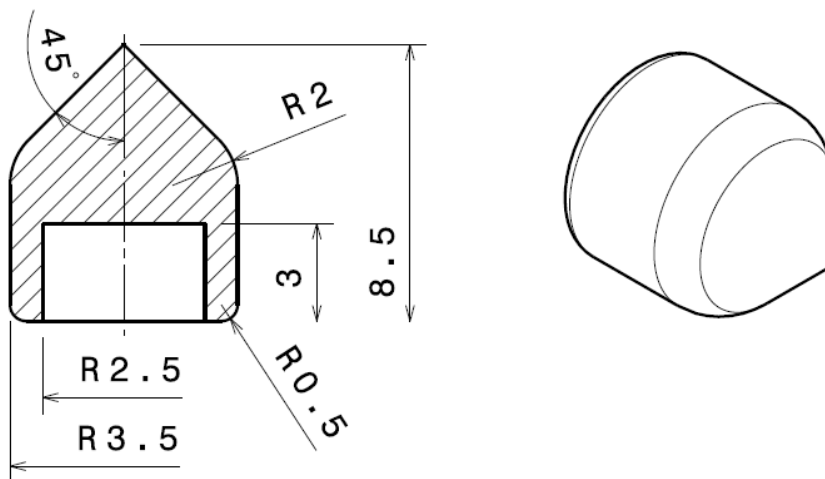
Der Korrosionsfortschritt wurde an unverzinkten und vorverzinkten KTL-beschichteten Stahlsubstraten (Z100) untersucht.

### 3.3.2 Steinschlag- und Korrosionsprüfungen

Um unterschiedliche Defekte in Beschichtungssysteme einzubringen, wurde ein Multi-Steinschlagtest [20] angewendet. Dieser dient standardmäßig zur Überprüfung der Beschichtungsqualität in der Serienfertigung bei Automobilherstellern.

Zusätzlich wurde eine Monosteinschlagprüfung (siehe 3.2) genutzt, um einzelne Defekte zu generieren und den Korrosionsfortschritt an definiert eingebrachten Beschädigungen der vorverzinkten und blanken KTL-beschichteten Stahlprobe reproduzierbar zu untersuchen.

Zur reproduzierbaren Einbringung von Defekten wurden speziell für die Anwendung optimierte Prüfgeometrien von Projektilen angefertigt (Abb. 42).



**Abb. 42 Geometrie des Projektils für die Einbringung von reproduzierbaren Defekten**

Durch eine Beschleunigung der Projektile auf eine Geschwindigkeit von 60 km/h und einen Aufprall auf die zu untersuchende Probe wurden Defekte in Oberflächen eingebracht. Anschließend wurden die Proben zur Untersuchung des Korrosionsfortschrittes in zwei verschiedene Korrosionswechselltests (VDA 621-415 und VDA 621-415B) ausgelagert.

### 3.3.3 Analysemethoden

Um thermographische Ergebnisse mit PPT von Steinschlagdefekten und des Korrosionsfortschrittes zu verifizieren, wurden Oberflächen- und Schliffbildanalysen vorgenommen. Hierbei wurden thermische Rückmeldungen von Defekten auf der Proben-

oberfläche lokalisiert und mit Hilfe von 3D-Oberflächenmessungen, metallografischen Schlibfbildanalysen und FIB-Schnitten mit einem physikalischen Defekt korreliert.

Im Folgenden werden der Aufbau der Puls-Phasen-Thermographie und die Methoden zur Verifizierung der Ergebnisse vorgestellt.

### Puls-Phasen-Thermographie

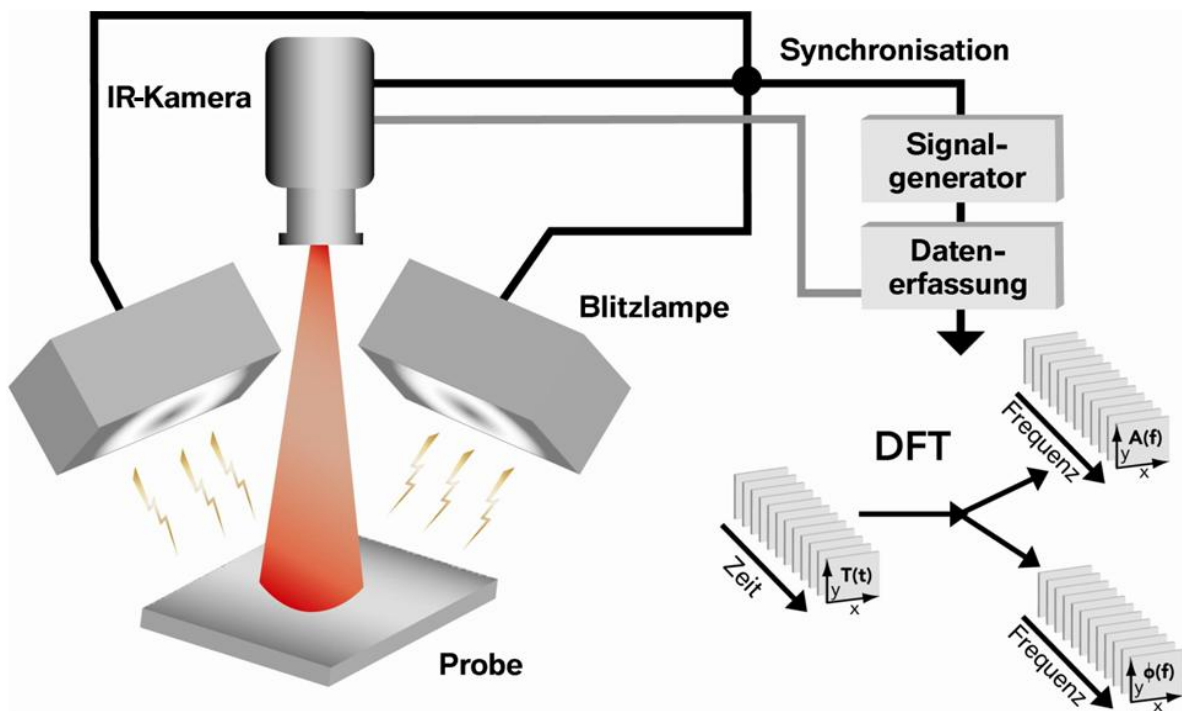


Abb. 43 Aufbau der Puls-Phasen-Thermographie

Der experimentelle Aufbau der Puls-Phasen-Thermographie besteht aus einer Thermographiekamera, zwei Blitzlampen, einem Signalgenerator und einem Rechner (Abb. 43).

Durch ein verfahrbares System kann der Abstand zwischen der Thermographiekamera (CEDIP Silver 660M, 3.6 bis 5.0  $\mu\text{m}$ , mit einem 640x512-Bildfeld) und dem Messobjekt variiert werden, um den Aufnahmebereich zu verändern. Zusätzlich kann der Aufnahmebereich durch verschiedene Objektive verändert werden. Darum wurde für Untersuchungen von großen Oberflächenbereichen ein Standardobjektiv (27mm 21°H x 17°V) genutzt. Kleinere Defekte wurden mit einem Mikroskopobjektiv (G0,5, 1:3.0) analysiert, um eine höhere laterale Auflösung zu erhalten.

Mit Hilfe von Blitzlampen mit einer Energie von 6 kJ wurden die Oberfläche erwärmt und thermische Wellen im Material erzeugt. Die Integrationszeit der Kamera wurde auf den Anwendungsfall optimiert, und Werte zwischen 500 und 6000  $\mu\text{s}$  bei einer Bildwiederholrate von 100 Hz wurden eingestellt. Dies ermöglicht, einen Overflow zu vermeiden und das erste Bild der Sequenz zu nutzen. Durch die Synchronisation der Kamera und der Blitzlampen werden reproduzierbare Ergebnisse erreicht, da die Aufnahmesequenz mit der Wärmeaufbringung durch die Synchronisation koordiniert werden konnte. Mit der gespeicherten Sequenz der thermischen Rückmeldung wurde eine diskrete Fourier-Transformation durchgeführt. Diese ermöglicht es ein Amplituden- und Phasenbild der Wellensequenz auszugeben. Beide Bilder konnten im Anschluss in einem Diagramm geplottet werden, um spezifische Werte der Amplitude mit der dazugehörigen Phase lokaler Bereiche zu vergleichen.

### **3D-Oberflächenmesstool (Infinite Focus Mikroskop)**

Um die Oberflächenvariation von Probeblechen zu messen und einen Überblick über die Art der Defekte von Steinschlagschäden zu erhalten, wurde ein Infinite-Focus-Mikroskop (Alicona InfiniteFocus® microscope, G3) vom Zentrum für Elektronenmikroskopie an der TU Graz verwendet. Dieses optische System ermöglicht es, Tiefenprofile und abgetragenes Oberflächenvolumen zu bestimmen. Hierbei kann die gute Tiefenschärfe eines Lichtmikroskops zusammen mit einem fahrbaren Tisch dazu genutzt werden, eine 3D-Rekonstruktion der Oberfläche zu generieren, bei der die Farbinformation beibehalten wird.

### **ESEM**

Für Oberflächen- und Schliffbildanalysen wurde ein Environmental Scanning Electron Microscope (FEI Quanta 200, ESEM) mit einem energiedispersiven Röntgenspektrometer (EDAX DX4) am Zentrum für Elektronenmikroskopie an der TU Graz genutzt. Mit Hilfe dieses Systems konnten Schichten identifiziert, Beschädigungen quantifiziert und der Korrosionsfortschritt im Detail analysiert werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Rasterelektronenmikroskopen ermöglicht das ESEM eine Untersuchung von nicht-leitenden Proben.

## FIB

Mit Hilfe eines Focused Ion Beam (FEI Nova Nanolab 200, FIB) konnten kleine Steinschlagdefekte, und der Korrosionsfortschritt im Detail ebenfalls an der TU Graz untersucht werden. Hierbei kann durch einen Ionenstrahl aus fokussierten Galliumionen, Material abgetragen und im Anschluss mit einem Rasterelektronenmikroskop der entstandene Querschnitt gerastert werden.

Für einzelne Schnitte wurde eine Strahlstromstärke von 20nA bei einer Beschleunigungsspannung von 20kV genutzt. Im Anschluss wurde der Schnitt mit 7nA bei 20kV gereinigt.

### 3.4 Untersuchung des Korrosionsfortschrittes

Um den Korrosionsfortschritt nach Steinschlagdefekten zu untersuchen, wurden Proben in Korrosionswechselltests nach VDA 621-415 und VDA 621-415B ausgelagert. Um diese Ergebnisse mit Felddaten zu vergleichen, wurden Hinterachskomponenten von Kundenfahrzeugen zurückgekauft und der Materialabtrag ermittelt. Um eine Prognose des Materialabtrags von Feldkomponenten zu erstellen, wurden Umweltdaten recherchiert, mit Abtragswerten korreliert und ein empirisches Materialabtragsmodell generiert.

#### 3.4.1 Laboruntersuchung des Korrosionsfortschrittes

Für Untersuchungen des Korrosionsfortschrittes, wurden verzinkte (Z100) und blanke Stahlsubstrate mit einer schwarzen KTL-Schicht ( $25 \mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ ) beschichtet. Um einen reproduzierbaren Defekt in das Beschichtungssystem einzubringen, wurde die Monosteinschlagprüfung (siehe 3.2) mit definiertem Prüfkörper (siehe 3.3.2) genutzt. Die präparierten Proben wurden nach jedem zweiten Zyklus des Korrosionswechselltests mit Puls-Phasen-Thermographie auf den Korrosionsfortschritt untersucht. Nach der Auslagerung wurde ein Teil der Proben gebeizt, damit der Materialabtrag mit dem 3D-Oberflächenmesstool bestimmt werden konnte. Ungebeizte Proben wurden mit metallografischen Schliffbildern und mit FIB-Schnitten untersucht.



### 3.4.2 Untersuchungen des Korrosionsfortschrittes von Fahrwerkskomponenten

Um den Korrosionsfortschritt an Fahrwerkskomponenten aus dem Feld zu untersuchen, wurden Abtriebswellen von Kundenfahrzeugen aus unterschiedlichen Regionen und unterschiedlichen Alters ausgewählt und ausgetauscht. Die Abtriebswelle (pulverbeschichtetes Stahlsubstrat) wurde nach der Intensität der Steinschlagbelastung und des optischen Korrosionsbildes bewertet und maximal belastete Komponenten der Region für Untersuchungen ausgewählt. Zusätzlich zu den Komponenten wurden Informationen über den Abstellort, Fahrtstrecken und Waschzyklen gesammelt. Neben den Angaben der Fahrer wurden umweltspezifische Informationen aus den Regionen gesammelt, in denen das Fahrzeug bewegt wurde.

Untersucht wurden Komponenten aus Deutschland (München, Dingolfing, Berlin), Österreich (Wien) und England (Wycombe).

Der Materialabtrag der Komponenten wurde durch Schliffbilder und eine anschließende lichtmikroskopische Analyse ermittelt. Um detaillierte Ergebnisse zu erhalten, wurden zusätzlich FIB-Schnitte und REM-Untersuchungen durchgeführt.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Steinbewurf von Fahrzeugen

Im Folgenden zeigen Untersuchungen mit einem orts- und fahrzeugfesten Kamerasystem die Steinkinematik von tangential und lateral abgeworfenen Steinen unter spezifischen Fahrzuständen. Hierbei zeigt eine Analyse der Steinmitnahme von Rädern (Vorderachse, angetriebene Hinterachse) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten den Einfluss der Zentrifugalkraft auf die maximalen Mitnahmewinkel von abgeworfenen Steinen. Zusätzlich wird die Steinkinematik an nicht konstant abrollenden Rädern (gleiten, durchdrehen) untersucht.

Untersuchungen mit dem ortsfesten Kameraaufbau ermöglichten eine Analyse der Steinflugbahnen im Inertialsystem (Tabelle 2). Hierbei werden die Geschwindigkeiten der Steine in den Raumkoordinaten in Bezug auf die Fahrgeschwindigkeit analysiert und ausgewertet. Mitnahmewinkel (Raddrehung vom Haften bis zum Abwurf der Steine) von Steinen am Reifen unter  $3^\circ$  wurden bei der Auswertung durch ihre hohe Anzahl und geringe maximale Flughöhe ( $\sim 7$  cm bei 80 km/h) vernachlässigt. Die Auswertung der Steinflugbahnen erfolgte gemäß 3.1.

Fahrgeschwindigkeit [km/h]			30		50		80	
Angetriebenes Rad (d)			n	d	n	d	n	d
Nicht angetriebenes Rad (n)								
Steingeschwindigkeit nach dem Abwurf [km/h]	$v_y$		0-2	0-2	0-3	0-3	0-5	0-5
	$v_z$		0-4,7	0-6,7	0-10,4	0-12,6	0-20	0-26
Abgeworfene Steine	Winkel-feld 1	Anzahl/m	9	10	10	11	33	44
		Mitnahmewinkel [°]	0-8,9	0-13	0-6,5	0-6,8	0-6,5	0-10
	Winkel-feld 2	Anzahl/m	X	X	3	5	5	6
		Mitnahmewinkel [°]			6,5-12	6,8-14,6	6,5-14,5	10-18

**Tabelle 2 Versuchsergebnisse der Steinkinematik (ortsfestes Kamerasystem)**

Länger vom Reifen mitgenommene Steine konnten durch den geringen Aufnahmebereich des ortsfesten Kamerasystems nicht aufgezeichnet werden. Darum wurden diese mit einem fahrzeugfesten Kamerasystem analysiert und im Relativsystem (Koordinatensystem bewegt sich mit Fahrzeuggeschwindigkeit) ausgewertet (Tabelle 3).

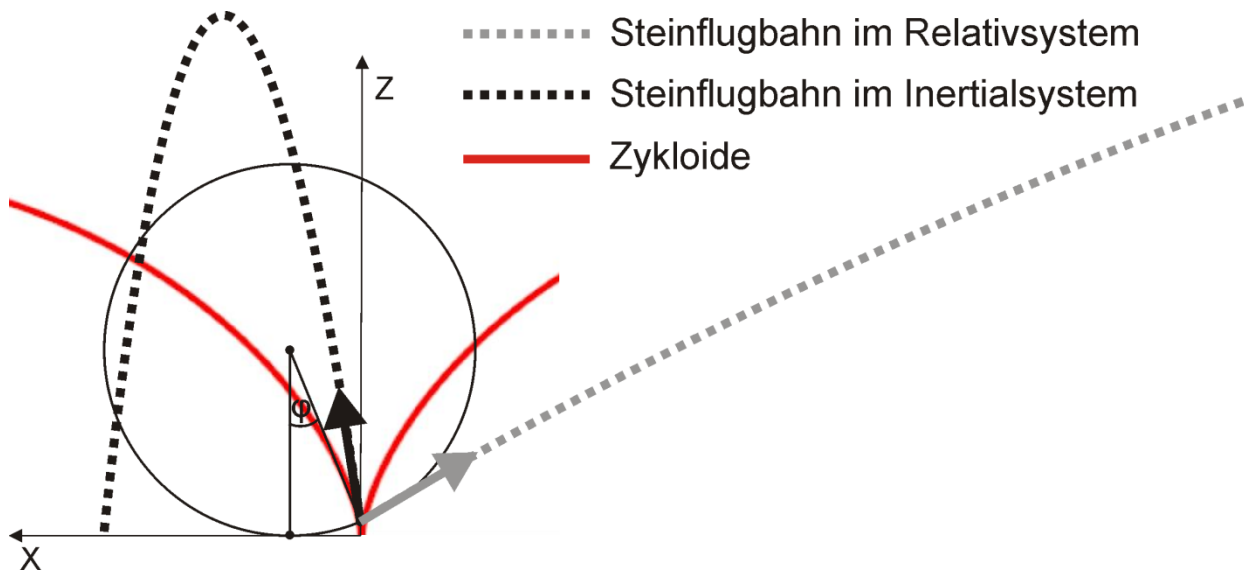
Fahrgeschwindigkeit [km/h]			30	50	80
Betrag der tangentialen Abwurfgeschwindigkeit [km/h]			30 ± 4	50 ± 3	80 ± 5
Abwurfgeschwindigkeit in Z-Richtung [km/h]			0 bis 29	0 bis 25	0 bis 20
Abgeworfene Steine	Winkelfeld 3	Anzahl/m	0,2	0,2	0,25
		Mitnahmewinkel [°]	9-34	12 -15	10 – 14,5
	Winkelfeld 4	Anzahl/m	0,1	0,1	X
		Mitnahmewinkel [°]	35 - 75	16 -30	

**Tabelle 3 Versuchsergebnisse der Steinkinematik (fahrzeugfestes Kamerasystem)**

#### 4.1.1 Steinkinematik unter trockenen Fahrbahnbedingungen

##### 4.1.1.1 Abwurfkinematik an nicht angetriebenen Rädern (xz-Achse)

Steine können eine bestimmte Zeit am rollenden Reifen haften. Der Winkel, den der Reifen dreht, während der Stein auf ihm haften kann, wird als Mitnahmewinkel definiert. Der Mitnahmewinkel beschreibt somit den Punkt, an dem der Stein abgeworfen wird. Der Abwurf stellt die Eingangsgrößen für die folgende Flugbahn dar, die durch einen schiefen Wurf charakterisiert ist. Um die Flugbahn des Steines zu erläutern, wird hierbei kurz auf die unterschiedlichen Koordinatensysteme eingegangen, mit denen sich die Flugkinematik verdeutlichen lässt. Im Inertialsystem wird ein Stein tangential zur Zykloide abgeworfen, wobei der Stein eine horizontale und vertikale Geschwindigkeitskomponente in Bezug auf das Inertialsystem erhält (Abb. 44). Werden die Steinflugbahnen aber im Relativsystem betrachtet, das sich mit Fahrzeuggeschwindigkeit bewegt, werden die Steine tangential vom Reifen abgeworfen (Abb. 44). Hierbei wird die x-Komponente der Fahrzeuggeschwindigkeit in die Bahnkurve eingerechnet.



**Abb. 44 Vergleich von Steinflugbahnen im Relativ- und Inertialsystem**

Zur besseren Vergleichbarkeit von Steinabwürfen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten werden im Folgenden der Mitnahmewinkel bewertet und Geschwindigkeitsvektoren von Steinen im Relativsystem angegeben.

Durch die Bewertung der Steinflugbahn im Relativsystem entspricht der Mitnahmewinkel von Steinen, dem Winkel den Steine nach dem tangentialen Abwurf vom Rad horizontal zur Fahrbahn einnehmen. In die Auswertung werden nur durch den Reifen mitgenommene und auch wieder ausgegebene Steine berücksichtigt. Steine mit hohen Klemmkraften, die nicht vom Reifen ausgeworfen werden, fließen nicht in die Auswertung ein. Diese Steine werden erst bei höheren Zentrifugalkräften ausgegeben, was durch die Begrenzung der Testgeschwindigkeit auf 80 km/h nicht untersucht werden konnte. Oder Steine verbleiben komplett im Profil bis dieses soweit abgefahren ist, bis der Stein wieder ausgegeben wird.

Ergebnisse aus den Fahrversuchen bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h zeigen im Mittel 9 Steine pro überfahrenen Meter, die bereits bei einer Reifendrehung von  $9^\circ$  abgeworfen werden. Der Mitnahmemechanismus ist auf die Adhäsion von Steinen an der Gummierung der Reifenlauffläche zurückzuführen. Bei verhakten Steinen, die durch unterschiedliche Geometrie und Größe verschieden starke Haftkräfte aufbauen können, wurden die Mitnahmewinkel durch eine stochastische Verteilung der Steinanzahl in zwei Winkelfelder eingeteilt. Verhakte Steine konnten mit einer durchschnittlichen Anzahl von 0,2 Steinen pro Meter bis zu  $34^\circ$  und mit einer Anzahl von 0,1 Steinen pro Meter sogar bis zu  $75^\circ$  einer Reifendrehung mitgenom-

men werden, was auf stärker ausgeprägte Adhäsionskräfte im Vergleich zur Haftung an der Gummierung schließen lässt. Die hohen Mitnahmewinkel bis  $75^\circ$  lassen sich auf geringe Zentrifugalkräfte bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h zurückführen.

Ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h reduziert sich der maximale Mitnahmewinkel adhäsiv an der Reifenlauf­fläche mitgenommener Steine durch die steigenden Zentrifugalkräfte auf  $6,5^\circ$ . Maximale Mitnahmewinkel bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h wurden durch verhakte Steine aus dem Profil gemessen, die in drei Winkel­felder eingeteilt werden konnten. Das Winkel­feld zwischen  $6,5^\circ$  und  $12^\circ$  zeigt eine hohe Anzahl verhakter Steine (3 Steine/m), die durch ein kurzzeitiges Öffnen von Lamellen und Profilen vor der Reifenaufstandsfläche aufgenommen und nach der Aufstandsfläche durch eine Entspannung des Profils wohl wieder ausgegeben werden. Durch das Öffnen der Lamellen und Profile nach der Aufstandsfläche verringern sich die Klemmkräfte des verhakten Steins und die Zentrifugalkräfte verursachen einen Abwurf. Hierbei ist zu erwarten, dass durch die Profilierung des Reifens der Mitnahmewinkel variieren kann. Der hier untersuchte Winterreifen hat ein stark ausgeprägtes Lamellensystem im Vergleich zu Sommerreifen. Zu erwarten ist, dass die Anzahl verklemmter Steine bei Sommerreifen geringer ausfallen wird. Denn nur eine geringere Anzahl von Steinen wird in das Profil eingedrückt und nicht durch das Öffnen von Lamellen wieder ausgegeben. Diese erreichen mit einer Anzahl von 0,2 Steinen pro Meter Mitnahmewinkel zwischen  $12^\circ$  und  $15^\circ$ . 0,1 Steine pro Meter, die stärker im Profil verklemmt sind, können maximale Abwurfwinkel von  $30^\circ$  erreichen. Der abnehmende maximale Mitnahmewinkel von Steinen ist auf die steigenden Zentrifugalkräfte bei höheren Geschwindigkeiten zurückzuführen.

Bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 80 km/h reduzieren sich die maximalen Mitnahmewinkel sogar auf  $14^\circ$ . Jedoch wurden 33 Steine bis zu einem Winkel von  $6,5^\circ$  gemessen. Hierbei zeigt sich, dass Mitnahmewinkel von adhäsiv an der Oberfläche haftenden Steinen im Vergleich zu Geschwindigkeiten von 50 km/h selbst bei steigenden Zentrifugalkräften nicht reduziert werden. Dies lässt sich mit Hilfe der Aufstandsfläche des Reifens und der Fahrbahn erklären. Unter der Reifenaufstandsfläche befindliche Steine werden zwischen Reifen und Fahrbahn verklemmt. Erst hinter der Reifenaufstandsfläche können diese Steine durch die auf sie wirkenden Zentrifugalkräfte abgeworfen werden. Darum liegt der maximale Mitnahmewinkel selbst bei erhöhten Zentrifugalkräften bei  $6,5^\circ$ . Jedoch zeigen die Ergebnisse bei 80 km/h eine erhöhte Anzahl von aufgenommenen Steinen.

Die steigende Anzahl mitgenommener Steine kann auf eine Temperaturerhöhung der Lauffläche und eine erhöhte Druckkraft des Reifens auf die Fahrbahn zurückgeführt werden. Unter diesen Umständen wird der Umfang des Reifens durch eine erhöhte Zentrifugalkraft vergrößert, was eine verkleinerte Kontaktfläche zwischen Reifen und Straße zur Folge hat. Dadurch wird die Gewichtskraft des Fahrzeugs auf eine kleinere Aufstandsfläche verteilt, und höhere Druckkräfte werden erzeugt.

Mitnahmewinkel bei 30 km/h



Winkel	Mechanismus	Anzahl [st /m]
■ 3° - 9°	Adhäsion Gummi	9
■ 9° - 34°	Verhakt im Profil	0.2
■ 34° - 75°	Verhakt im Profil	0.1

Mitnahmewinkel bei 50 km/h



Winkel	Mechanismus	Anzahl [st /m]
■ 3.0° - 6.5°	Adhäsion Gummi	10
■ 6,5° - 12.0°	Verhakt im Profil	3
■ 12.0° - 15.0°	Verhakt im Profil	0.2
■ 16.0° - 30.0°	Verhakt im Profil	0.1

Mitnahmewinkel bei 80 km/h



Winkel	Mechanismus	Anzahl [st /m]
■ 3.0° - 6.5°	Adhäsion Gummi	33
■ 6,5° - 14.0°	Verhakt im Profil	4

**Abb. 45 Mitnahmewinkel und –mechanismus von Steinen am Reifen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten**

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Mitnahmewinkel von im Profil transportierten Steinen bei niedrigen Geschwindigkeiten ein Maximum erreicht, da die Zentrifugalkräfte schwächer ausgeprägt sind. Bei adhäsiv an der Gummierung haftenden

Steinen nimmt der Mitnahmewinkel durch die steigende Zentrifugalkraft ebenfalls ab. Jedoch kann ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h ein konstanter Mitnahmewinkel von adhäsiv haftenden Steinen beobachtet werden. Dieser Winkel hängt nicht von der Zentrifugalkraft ab, sondern von der Geometrie des Reifen-Fahrbahn-Kontakts, der vor allem durch die Reifenaufstandsfläche charakterisiert ist.

Dieser Einfluss wird auch durch unterschiedliche Reifengeometrien, Luftdruck im Reifen, Reifendurchmesser und Fahrzeuggewicht bestimmt, da die Aufstandsfläche des Reifens durch diese Größen stark variiert.

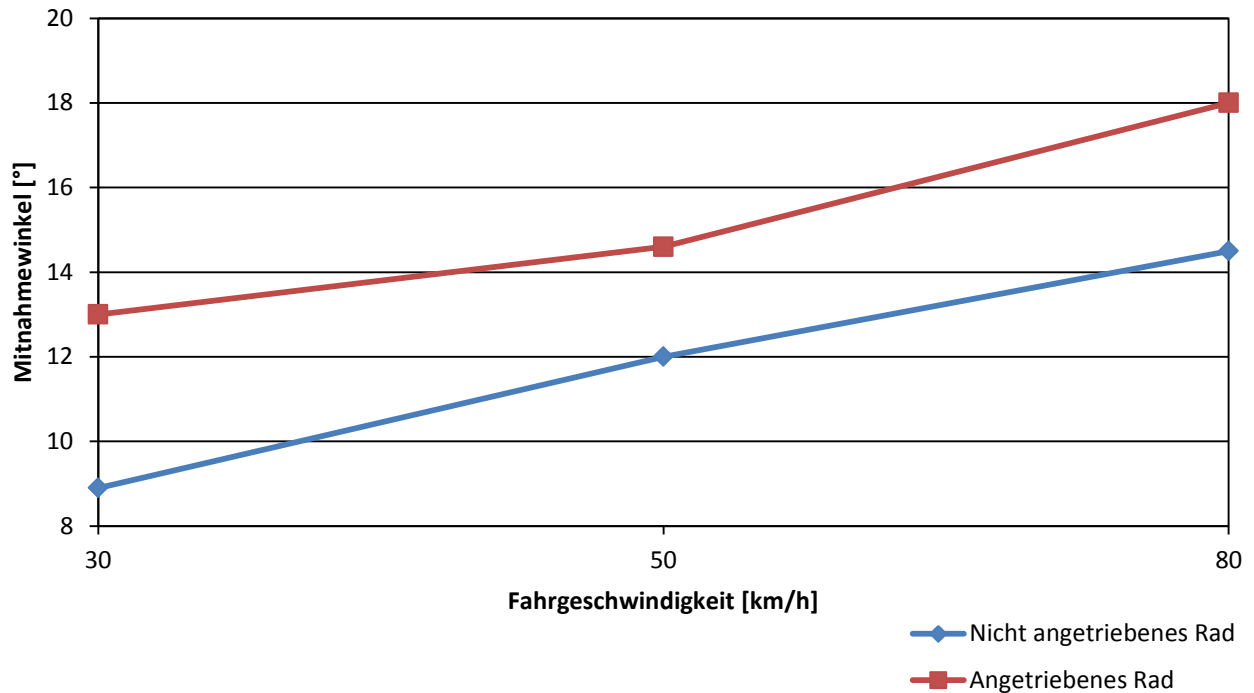
Die Versuchsreihe zeigt eine steigende Anzahl mitgenommener Steine mit höheren Fahrgeschwindigkeiten, was auf eine Temperaturerhöhung und eine geringere Aufstandsfläche des Reifens bei höheren Geschwindigkeiten zurückzuführen ist [121, 122].

#### 4.1.1.2 Abwurfkinematik an angetriebenen Rädern (xz-Achse)

Analysen der Steinmitnahme an konstant abrollenden angetriebenen Hinterrädern zeigen eine Änderung der Winkelfelder im Vergleich zu nicht angetriebenen Vorder- rädern. Hierbei stellten sich erhöhte Mitnahmewinkel von Steinen ein, die an der Reifenlauf- fläche haften (Abb. 46).

Diese Erhöhung der Mitnahmewinkel ist auf den Schlupf des angetriebenen Rades und auf die höheren Aufstandskräfte (Gewichtsverteilung Vorder- und Hinterachse) zurückzuführen. Infolge der erhöhten Aufstandskräfte des Fahrzeugs an der Hinter- achse wird auch die Aufstandsfläche, die der Reifen mit der Fahrbahn einnimmt, er- höht.

Durch die Kombination der beiden Einflussgrößen ist es nicht möglich, die Erhöhung der Mitnahmewinkel auf eine Größe zu reduzieren.



**Abb. 46 Maximaler Mitnahmewinkel von Steinen an angetriebenen und nicht angetriebenen Rädern**

#### 4.1.1.3 Laterale Abwurfkinematik von Steinen (xy-Achse)



**Abb. 47 Lateraler Abwurfwinkel (Ansicht von oben)**

Steine werden nicht nur tangential vom Reifen abgeworfen, sondern können zusätzlich einen lateralen (y-Richtung) Geschwindigkeitsvektor erhalten. Diese lateralen Abwürfe können Winkel von  $3,6^\circ \pm 0,2^\circ$  unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit einnehmen (Abb. 47). Ermöglicht wird dies durch die elastischen Eigenschaften der Gummierung. Steine werden bei der Überfahrt durch Kräfte zwischen der Fahrbahn und dem Reifen in die Gummierung der Lauffläche eingedrückt. Die Gummierung passt sich der geometrischen Form des Steines an, und Schub- sowie Druckspannungen werden induziert. Bei der elastischen Rückverformung der Gummierung werden diese Spannungen aufgelöst und die gespeicherte Verformungsenergie wieder abgegeben. Hierbei kann der Stein je nach der Spannungsrichtung einen Anteil an kinetischer Energie in lateraler oder normaler Komponente erfahren.



Durch diese Energieübertragung kann der Stein eine laterale Geschwindigkeitskomponente unabhängig von der Position am Reifen erhalten. Zusätzlich kann bei der Rückverformung des Reifens nach dem Kontakt zur Fahrbahn (Reifenauflandsfläche) eine laterale Geschwindigkeitskomponente übertragen werden [122].

#### 4.1.1.4 Abwurfkinematik von Steinen bei gleitenden Reifen (xy-Achse)



**Abb. 48 Pinching-Effekt des rutschenden Vorderrades bei 80 km/h**

Ein gleitendes Rad erzeugt eine Relativgeschwindigkeit zwischen der gleitenden Reifenlauffläche und der Fahrbahn. Dadurch wird einem auf der Fahrbahn liegenden Stein eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente durch die relative Geschwindigkeit (x-Komponente) des Rades aufgeprägt. Weitere auf den Stein wirkende Kräfte zeigen einen Einfluss auf die laterale Geschwindigkeitskomponente (y-Richtung) der Flugbahn. Konnten bei konstant abrollenden Rädern nur late-

rale Abwurfwinkel von  $3,6^\circ \pm 0,2^\circ$  ermittelt werden, so können diese bei gleitenden Rädern stark zunehmen. Die gleitenden Reifen erzeugen hierbei Reibkräfte zwischen der Straßenoberfläche und der Reifenlauffläche. Befindet sich ein Stein auf der Fahrbahn, erfährt dieser Druck- und Scherkräfte der gleitenden Reifenfläche. Steine, die an Kanten von Profilblöcken oder am Reifenrand eine Kraftübertragung erfahren, werden durch Quetscheffekte zur Seite beschleunigt.

Dieser Mechanismus wird auch Pinching-Effekt genannt. Dabei werden die Steine unter einem großen Winkel zur Seite beschleunigt. Zusätzlich erhalten diese Steine eine Geschwindigkeitskomponente in Fahrtrichtung (x-Komponente), die durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Stein und Reifenlauffläche erzeugt werden.

Der Pinching-Effekt ist bereits bei 80 km/h selbst bei geringem negativen Schlupf der Reifen stark ausgeprägt und kann in Abwürfe vom Reifenrand und vom Profil unter-

teilt werden. Seitliche Abwürfe vom Profil waren geringer ausgeprägt ( $\beta_{\max}=10^\circ$ ) als die vom Reifenrand ( $\beta_{\max}=17^\circ$ ) verursachten. Diese lateralen Abwurfwinkel setzen sich aus einer geringeren x- und höheren y-Komponente der Flugbahn zusammen. Durch eine Kombination dieser beiden Geschwindigkeiten kann ein hoher lateraler Abwurfwinkel im Relativsystem erreicht werden [122].

#### 4.1.1.5 Abwurfkinematik von Steinen bei durchdrehenden Reifen (xy-Achse)

Von durchdrehenden Rädern abgeworfene Steine zeigen einen geringen Mitnahmewinkel. Der Reifen wirkt hierbei wie ein Schaufelrad, das Steinen eine negative Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung verleiht. Durch die geringe z-Komponente der Geschwindigkeit erreichten Steine nur geringe Flughöhen, die von durchdrehenden Rädern der Hinterachse verursacht wurden.

Die Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung wird aber stark von der Fahrbahnbeschaffenheit abhängen. Hierbei ist zu erwarten, dass sich der Reifen bei einer dichten Splittdecke eingraben wird und so Steine bei höheren Reifendrehwinkeln abgeworfen werden.

#### 4.1.2 Steinbewurf unter nassen Fahrbahnbedingungen



	Winkel	Mechanismus	Steingröße
■	0° - 180°	Kapillarkraft	<2mm

**Abb. 49 Mitnahmewinkel von Steinen auf nasser Fahrbahn unabhängig von der Geschwindigkeit**

Auf nasser Fahrbahn konnte keine erhöhte Aufnahme von verklemmten Steinen festgestellt werden, wogegen adhäsiv haftende kleine Steine (< 2mm) auf nasser Straße vermehrt aufgenommen und annähernd gleichverteilt bis zu einem maximalen Mitnahmewinkel von  $\varphi_{\max}=180^\circ$  vom Reifen abgeworfen wurden.

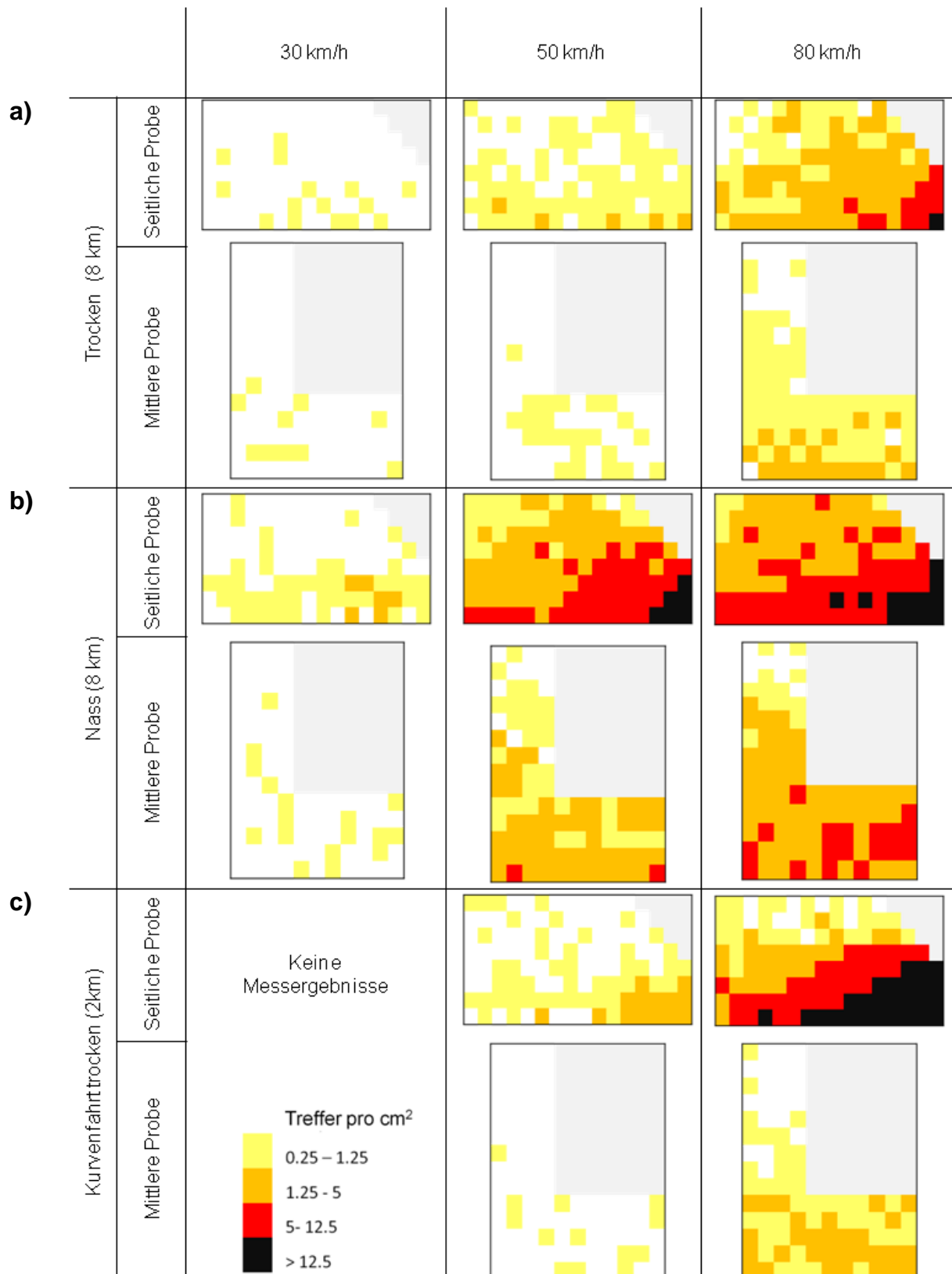
Steine mit einer geringen Partikelgröße werden durch Kapillarkräfte an der Gummierung der Lauffläche und im Profil durch Bildung von Flüssigkeitsbrücken mitgenommen. Eine numerische Analyse von mitgenommenen Steinen war jedoch durch die hohe Anzahl nicht möglich [122].

#### 4.1.3 Steinschlaghäufigkeit und -intensität an der Hinterachse

##### **Steinschlaghäufigkeit**

Untersuchungen der Steinschlaghäufigkeit an der Hinterachse haben gezeigt, dass die Anzahl der Treffer von der Geschwindigkeit (30 km/h, 50 km/h, 80km/h), den Straßenbedingungen (feucht, trocken) und dem Fahrzustand (Gerade, Kurve) abhängt. Ergebnisse zeigen eine ansteigende Anzahl an Steinschlagtreffern mit steigenden Fahrzeuggeschwindigkeiten und unter nassen Fahrbahnbedingungen (Abb. 50).

Diese Ergebnisse können durch die bereits beschriebenen unterschiedlichen Einflussgrößen auf die Mitnahmewinkel begründet werden. Die Verteilung der Steinschlagbereiche weist ein Maximum an Bereichen auf, die eine niedrige und reifen-nahe Position haben. Dies kann durch eine hohe Anzahl von adhäsiv an der Gummierung mitgenommen Steinen, die einen lateralen Abwurfwinkel von  $3,6 \pm 0,2^\circ$  aufweisen, beschrieben werden. Eine abnehmende Anzahl von Steinschlagtreffern konnte an seitlichen und vertikal höher gelegenen Bereichen festgestellt werden, die vor allem durch reflektierte Steine hervorgerufen werden.



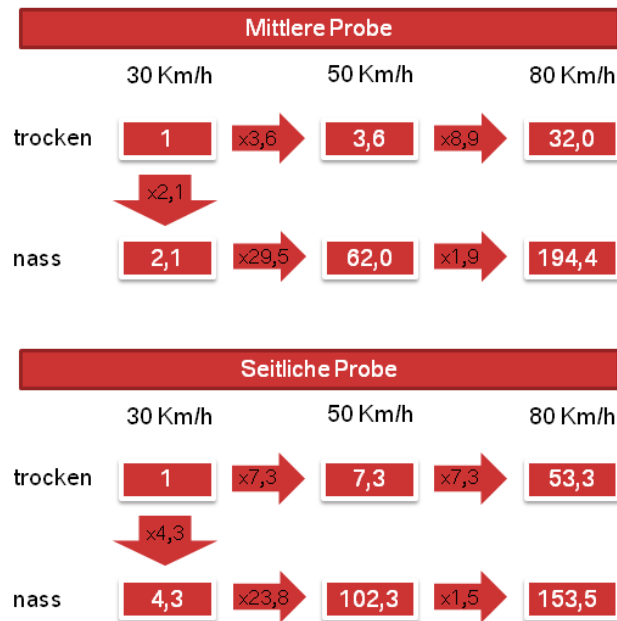
**Abb. 50: Verteilung der Steinschlaghäufigkeit an der Hinterachse unter unterschiedlichen Bedingungen**

Nasse Bedingungen erhöhen die Gesamtanzahl an Treffern. Zudem liegen diese in vertikal höher gelegenen Bereichen im Vergleich zu trockenen Straßenbedingungen. Abbildung 51 zeigt den Faktor, um den die Belastung an den Probeblechen in Bezug auf die Geschwindigkeit und die Feuchte im relativen Vergleich zu Ergebnissen bei 30 km/h unter trockenen Bedingungen zunimmt. Hierbei führt die Feuchte bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 30

km/h auf 50 km/h zu einer stark erhöhten Zahl von Steinschlagtreffern. Der Faktor der mittleren Probe betrug 29,5. Durch steigende Fahrzeuggeschwindigkeiten mit einer vermehrten Aufnahme von Steinen ist eine Zunahme von Steinschlägen messbar. Nicht nur die Häufigkeit der Aufnahme, sondern auch die Flugbahn der Steine hat einen Einfluss auf die Trefferhäufigkeit an der Hinterachse. Bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten erreichen Steine die Hinterachse später als bei hohem Tempo. Eine zeitlich

längere Flugbahn der Steine ermöglicht der Gravitation länger zu wirken, bevor der Stein die Hinterachse trifft. Hierbei wird die z-Geschwindigkeit reduziert, und die Steinflugbahn erreicht relativ zur Fahrzeugbewegung früher ihren Scheitelpunkt. Das kann auch zur Folge haben, dass Steine wenn Sie die Hinterachse erreichen, sich bereits wieder am Boden befinden.

Die Versuchsreihe bei einer Kurvenfahrt zeigte eine starke Belastung des kurveninneren Probebleches. Jedoch wurden auch Probebleche in mittleren und sogar in kurvenäußeren Bereichen im Vergleich zur Geradeausfahrt vermehrt getroffen. Dieser Effekt kann durch Gegenlenken nach der Kurvenausfahrt oder durch eine Erhöhung des Pinching-Effekts von rutschenden Reifen während einer Kurvenfahrt (Schräglaufwinkel) verursacht werden. Jedoch konnte auch festgestellt werden, dass bei einer Kurvenfahrt vor allem niedrig gelegene Bereiche von Steinschlag betroffen waren (Abb. 50 c).



**Abb. 51: Multiplikationsfaktor von Einflussfaktoren auf die Steinschlagdichte**

### Steinschlagintensität

Untersuchungen der Steinschlagintensität haben einen Schichtverlust und eine Delamination der KTL-Beschichtung bereits bei Fahrgeschwindigkeiten von 30 km/h gezeigt (Abb. 52).

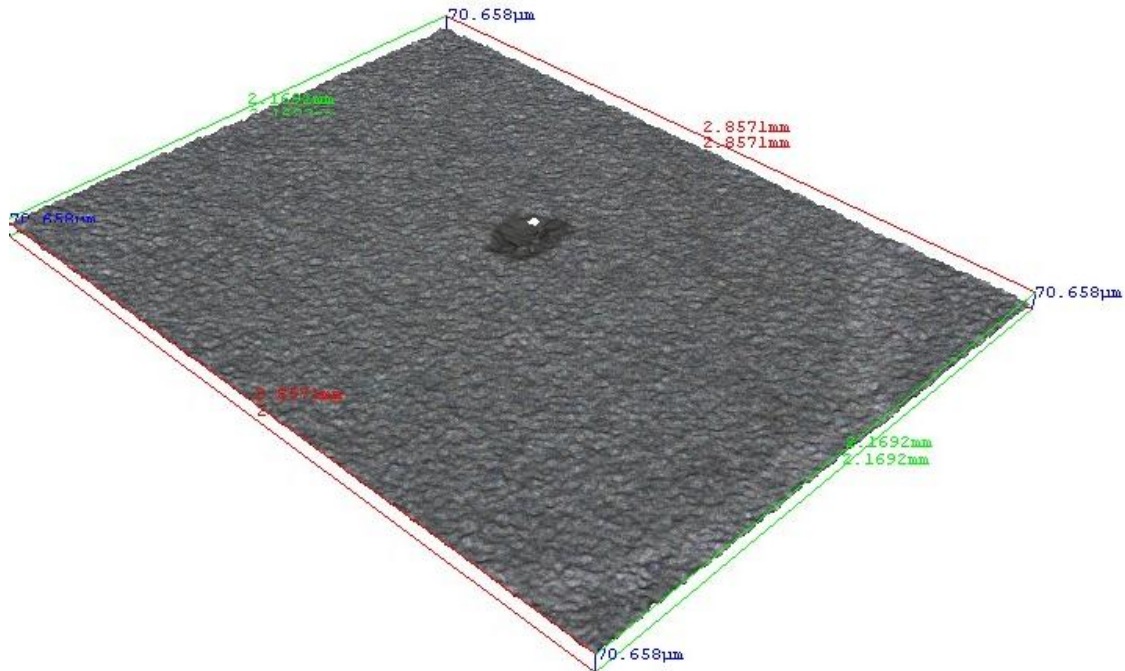


Abb. 52 Optisches 3D-Bild eines Steinschlagdefektes bei 30 km/h

Es wurden Bereiche mit einem Schichtverlust (Kohäsionsbruch) bis zu einem Durchmesser von 200 µm ermittelt, wobei keine plastische Verformung des Substrates auftrat. Untersuchungen unterschiedlicher Bereiche der Probenoberfläche haben keinen Einfluss der Position auf den Beschädigungsgrad gezeigt.

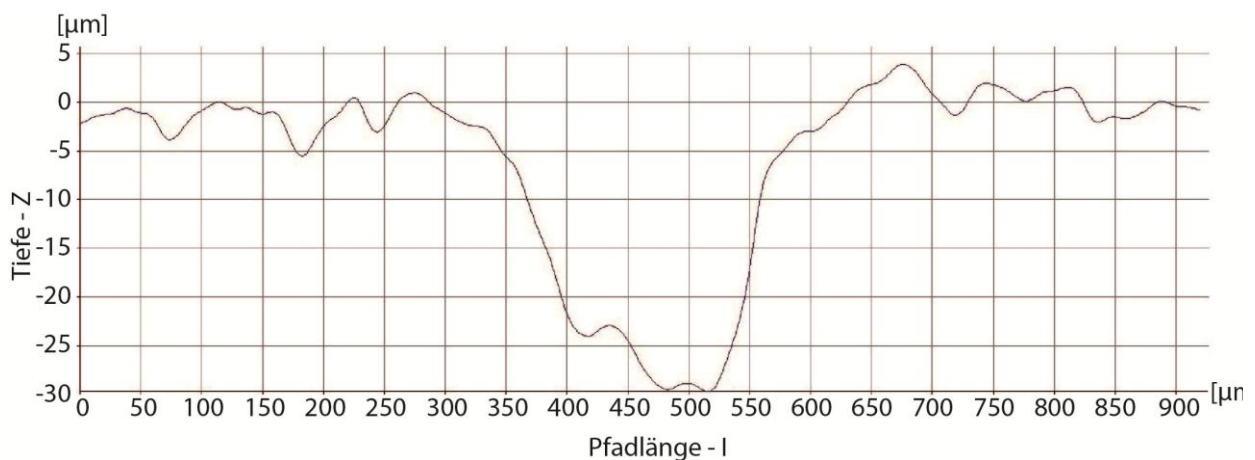
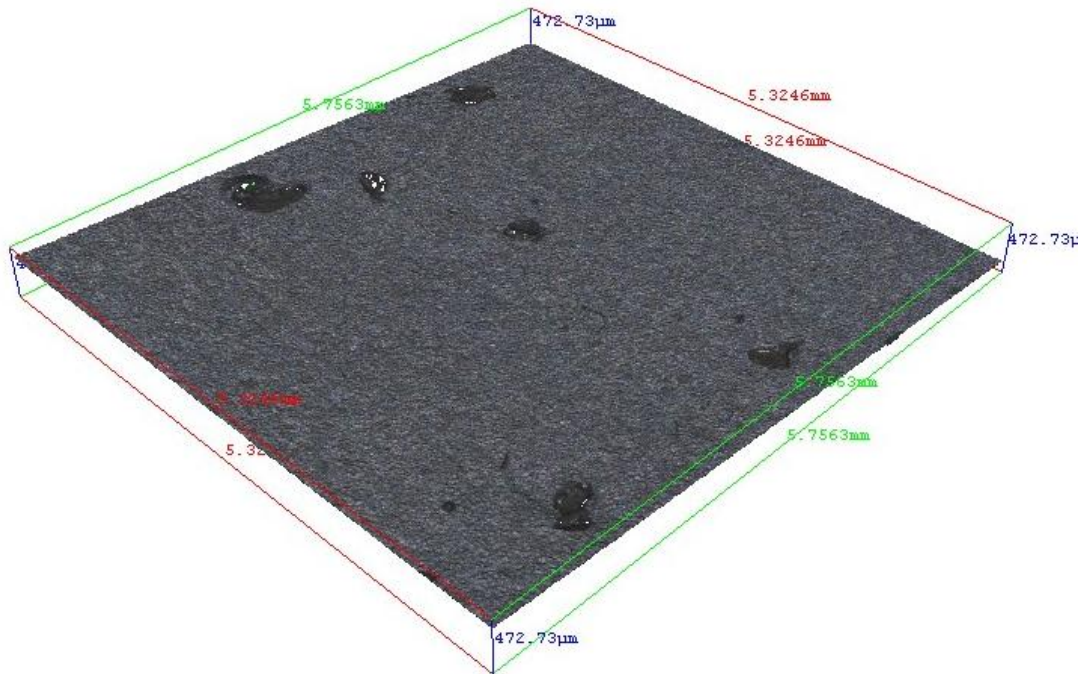


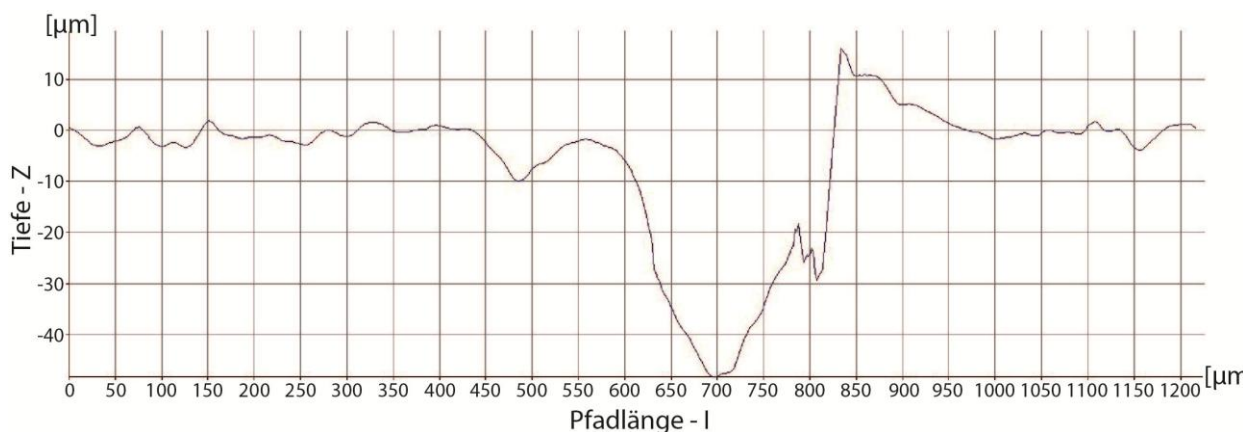
Abb. 53 Topographie eines Steinschlagdefektes bei einer Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h

Ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h konnte bereits ein Schichtverlust durch aufprallende Steine von einer Fläche bis zu einem Durchmesser von 600  $\mu\text{m}$  festgestellt werden (Abb. 54).



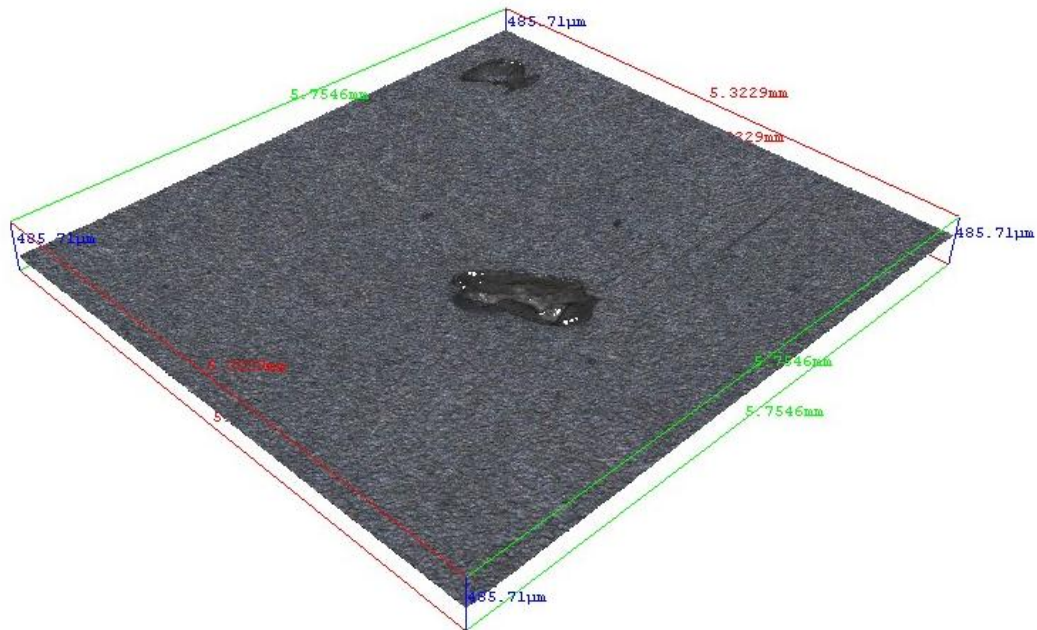
**Abb. 54** Optisches 3D-Bild von Steinschlagdefekten bei 50 km/h

Topographische Analysen der Steinschlagdefekte haben eine plastische Deformation des Substrates bis zu einer Tiefe von 20  $\mu\text{m}$  ergeben. Diese Beschädigungen legen das Substrat frei, und Korrosion kann durch einen Elektrolyten induziert werden. Untersuchungen unterschiedlicher Bereiche der Probenoberfläche haben vergleichbare Defekte gezeigt.



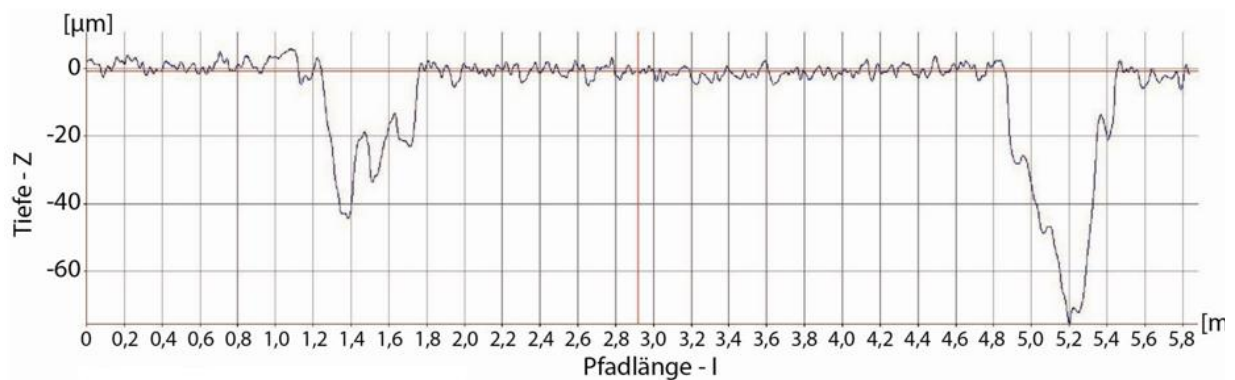
**Abb. 55** Topographie eines Steinschlagdefektes bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h

Bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 80 km/h aufprallende Steine, verursachten an der KTL-Beschichtung einen Schichtverlust von Durchmessern bis zu 1500  $\mu\text{m}$ .



**Abb. 56** Optisches 3D-Bild von Steinschlagdefekten bei 80 km/h

Eine plastische Verformung des Substrates konnte hierbei bis zu einer Tiefe von 43  $\mu\text{m}$  gemessen werden [122].



**Abb. 57** Topographie eines Steinschlagdefektes bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h



## 4.2 Stoßphysik von Projektilen auf ausgewählten Materialien

Im Folgenden werden Ergebnisse des normalen und tangentialen Restitutionskoeffizienten von Polyethersulfon-Polypropylen (PES/PP), Polypropylen-Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (PP EPDM), Stahlblech, Asphalt und Gummi vorgestellt. Es wird auf die Abhängigkeit des Restitutionskoeffizienten von den Materialeigenschaften des Targets und der Geschwindigkeit sowie der Geometrie des Aufprallkörpers eingegangen.

### 4.2.1 Flachnadelvlies (PES/PP) der Radhausschale

Flachnadelvlies zeigt bei niedrigen Aufprallgeschwindigkeiten ( $\sim 2\text{m/s}$ ) des sphärischen Keramikprojektils einen normalen Restitutionskoeffizienten (coefficient of restitution COR) von 0,55. Ab Geschwindigkeiten von 7 m/s sinkt dieser aber bereits auf 0,25 und nimmt bis zu Geschwindigkeiten von 57 m/s weiter bis zu einem Wert von 0,16 ab (Abb. 58). Das Material wird somit ab Geschwindigkeiten von 7 m/s durch die Umwandlung der kinetischen Energie in Formänderungsarbeit von 0,03 J beaufschlagt. Bei Geschwindigkeiten von 57 m/s erhöht sich die Formänderungsarbeit auf 2,23 J. Dagegen zeigt der tangentiale COR konstante Werte von  $0,60 \pm 0,01$ . Dieser hohe Verlust an kinetischer Energie in tangentialer Richtung wird durch die raue Oberflächenstruktur von Flachnadelvlies verursacht.

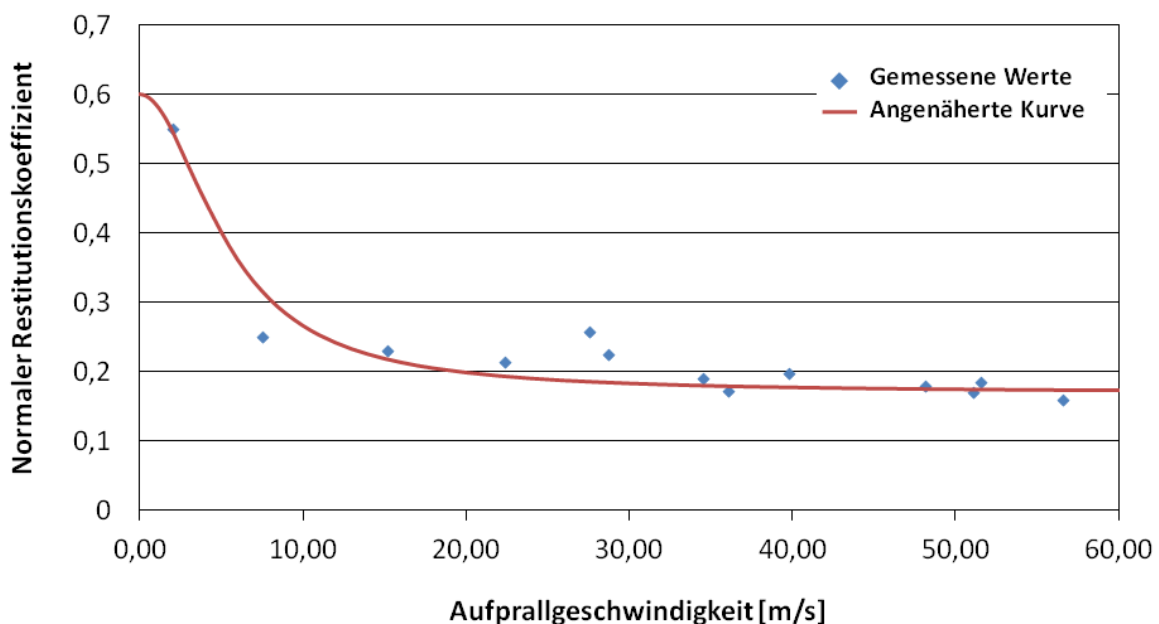


Abb. 58 Normaler Restitutionskoeffizient von Flachnadelvlies bei einem sphärischen Aufprallkörper aus Keramik

Untersuchungen des geometrischen Einflusses von scharfkantigen Splittsteinen zeigen eine erhöhte Streuung rückprallender Steine (Abb. 59). Ein maximales Streufeld ( $\pm 62^\circ$ ) wurde bei einem senkrechten Aufprallwinkel ermittelt, das stärker in Richtung der Gravitation ausgeprägt ist. Splittsteine haben einen großen Einfluss auf den Stoß, da durch den geometrischen Einfluss die Stoßparameter (Aufprallfläche, Stoßlinie) verändert werden können. Hierbei zeigt sich, dass der normale und tangentielle Restitutionskoeffizient je nach Aufprallgeometrie variieren können.

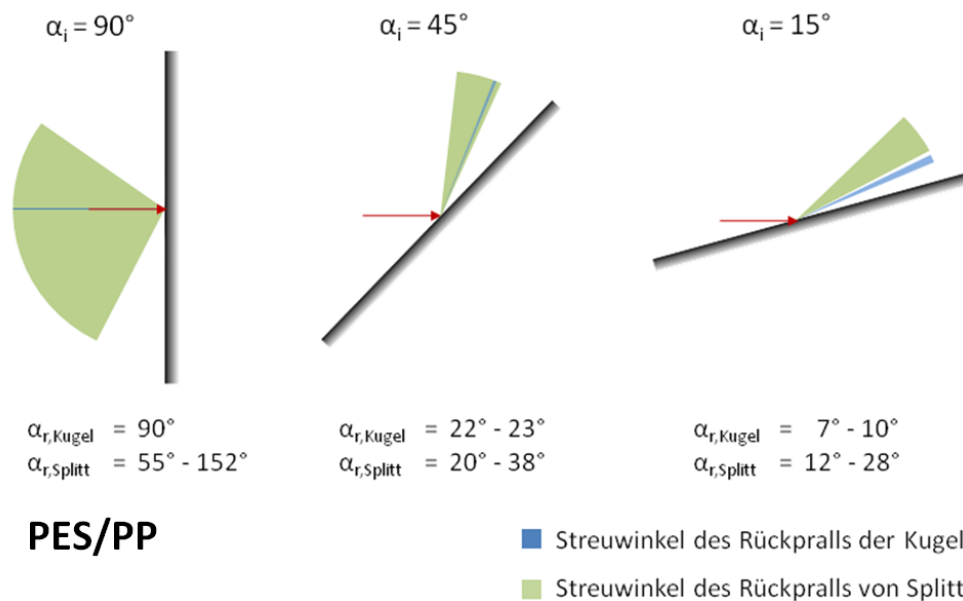
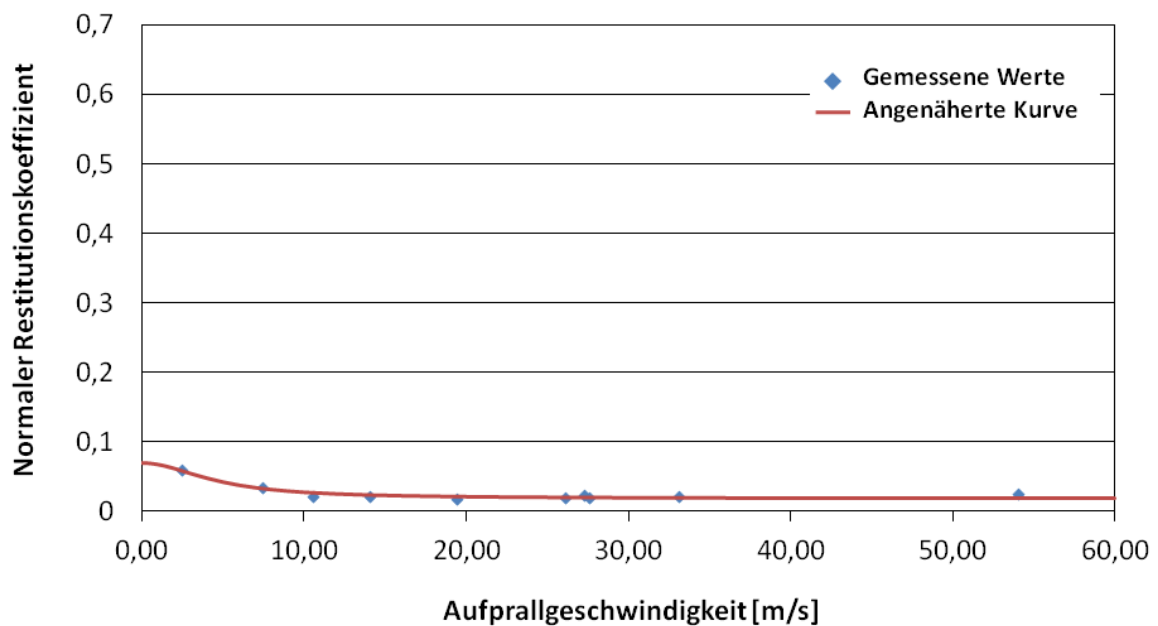


Abb. 59 Streuwinkel von aufprallenden Splittsteinen auf Flachnadelvlies bei 10 m/s

#### 4.2.2 Kunststoff (PP EPDM) der Radhausschale

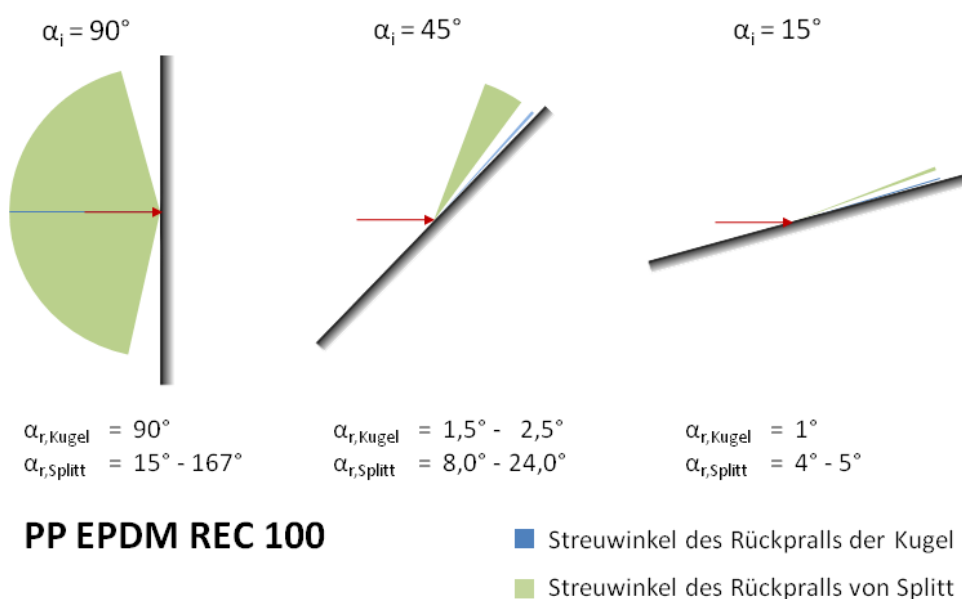
PP-EPDM REC 100 zeigt beim Aufprall eines sphärischen Projektils selbst bei niedrigen Geschwindigkeiten einen geringen normalen Restitutionskoeffizienten (0,07) des Stoßes (Abb. 60). Bei Aufprallgeschwindigkeiten von 7m/s tritt bereits die doppelte Formänderungsarbeit (0,047J) im Vergleich zu Flachnadelvlies auf. Bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten reduziert sich der normale Restitutionskoeffizient bis auf 0,02 und absorbiert die kinetische Energie des Projektils fast vollständig.

Der tangentielle Restitutionskoeffizient hingegen weist durch die glatte Oberflächenstruktur des Materials konstante Werte von  $0.85 \pm 0.01$  bei Geschwindigkeiten von 10 m/s auf.



**Abb. 60** Normaler Restitutionskoeffizient von Polypropylen EPDM REC 100 bei einem sphärischen Aufprallkörper aus Keramik

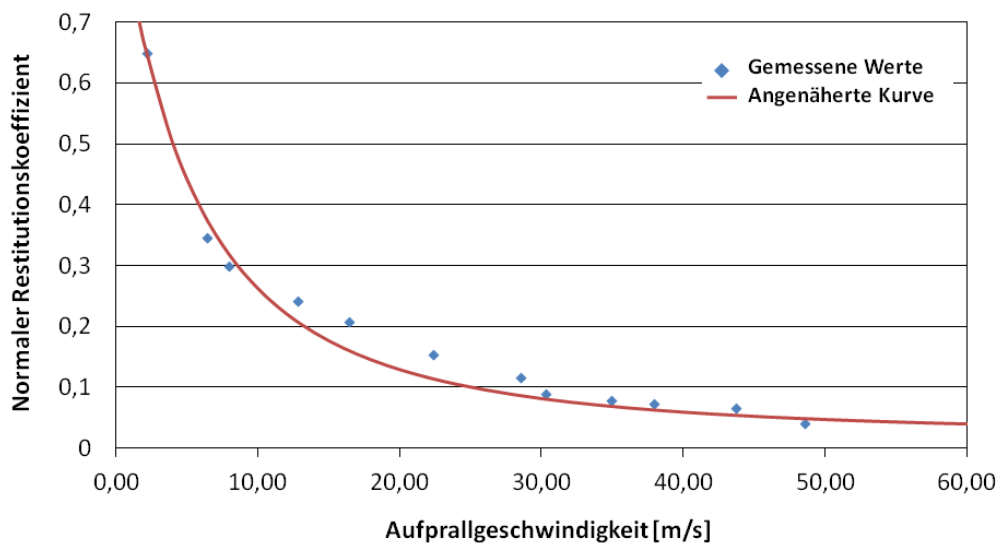
Untersuchungen mit Splittsteinen zeigen einen großen Einfluss der Geometrie des Aufprallkörpers auf die Restitutionskoeffizienten (Abb. 61). Die Streuung bei den Rückprallwinkeln wird durch das stark Energie absorbierende System verstärkt. Hierbei werden bei einem senkrechten Aufprall Streuwinkel von  $\pm 77^\circ$  zur Normalen erreicht, die bei flacheren Aufprallwinkeln geringer werden. Im Vergleich zu Untersuchungen mit einem sphärischen Aufprallkörper erhöhen scharfkantige Geometrien die Rückprallwinkel.



**Abb. 61** Streuwinkel von aufprallenden Splittsteinen auf Polypropylene PP EPDM REC 100 bei 10 m/s

### 4.2.3 Unlegiertes Stahlblech von Fahrwerkskomponenten

Der normale Restitutionskoeffizient von einer Keramikkugel auf Stahl hat bei niedrigen Geschwindigkeiten einen maximalen Wert von 0,65. Bei hohen Aufprallimpulsen und steigender plastischer Verformung des Stahlblechs werden Werte von 0,04 erreicht (Abb. 62). Die Kurve des normalen Restitutionskoeffizienten über der Geschwindigkeit kann mit der Formänderungsarbeit korreliert werden.



**Abb. 62 Normaler Restitutionskoeffizient von Stahlblech bei einem sphärischen Aufprallkörper aus Keramik**

Der tangentielle Restitutionskoeffizient hat konstante Werte von  $0,98 \pm 0,01$ , die durch homogene, ebene Oberflächen hervorgerufen werden. Darum wird die tangentielle Geschwindigkeitskomponente des Keramikprojektils beim schrägen Aufprall kaum beeinflusst.

Das Streufeld von rückprallenden Splittsteinen zeigt die geringsten Werte über die gesamte Versuchsreihe mit Winkeln von  $\pm 20^\circ$  (Abb. 63). Daraus kann abgeleitet werden, dass bei geringerer Energieabsorption des Materials Streuwinkel von Steinen beim Rückprall abnehmen. Flache Aufprallwinkel zeigen vergleichende Streufelder unterschiedlicher Aufprallgeometrien.

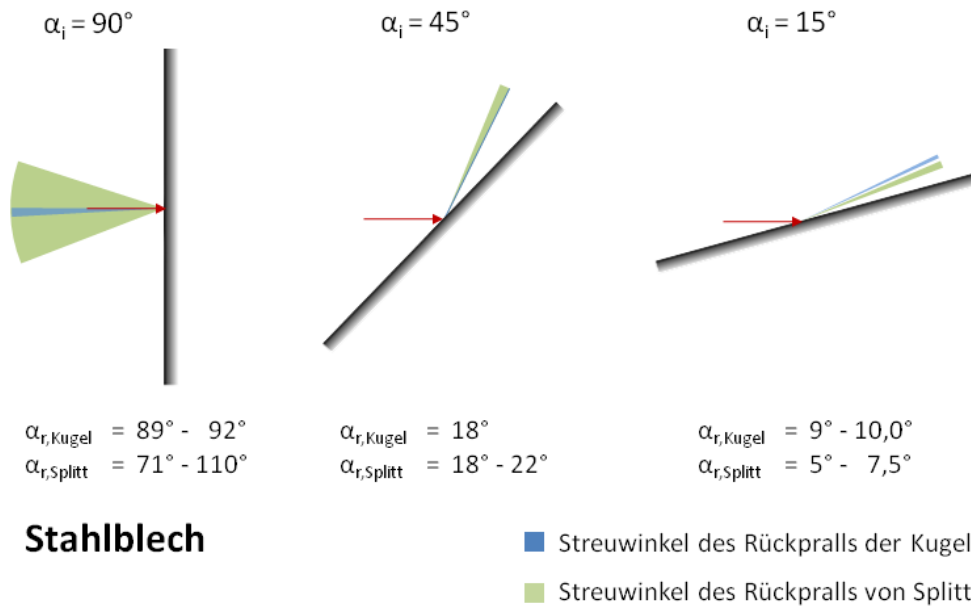


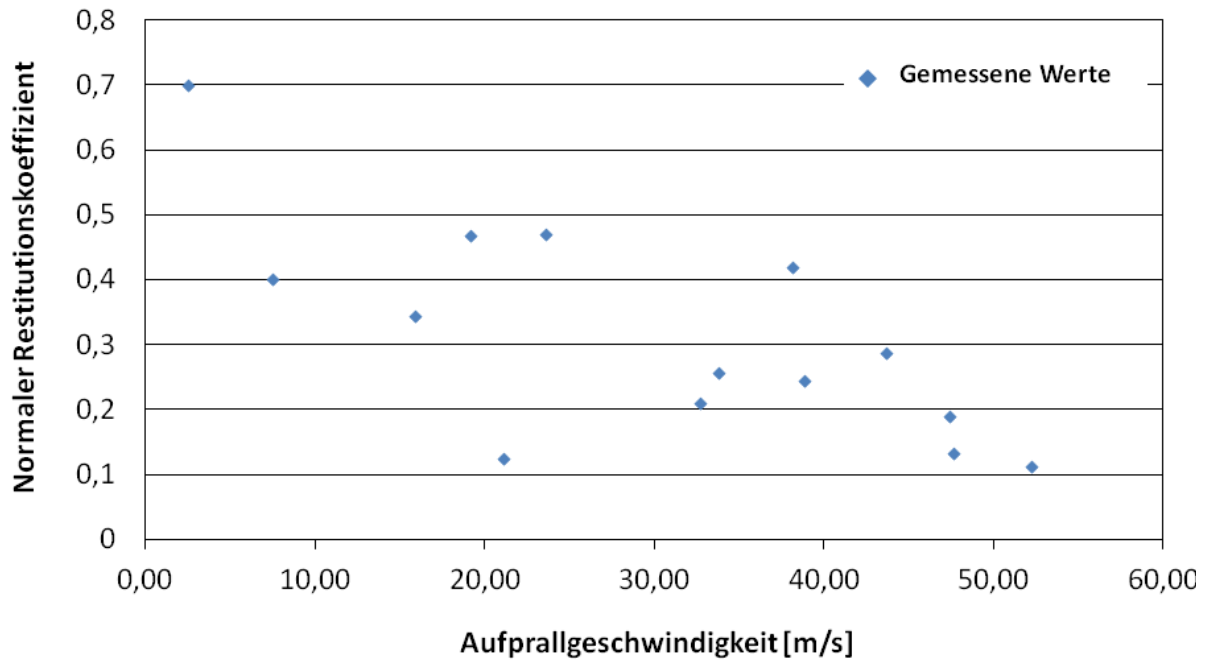
Abb. 63 Streuwinkel von aufprallenden Splittsteinen auf Stahlblech bei 10 m/s

#### 4.2.4 Asphalt

Die ermittelten Werte des normalen Restitutionskoeffizienten von einer Keramikkugel auf Asphalt variieren stark (Abb. 64). Unebenheiten beeinflussen den Stoß durch nicht definierbare Normalgeraden der Stoßlinie, die aufprallende Körper in stark abweichende Richtungen reflektieren lassen.

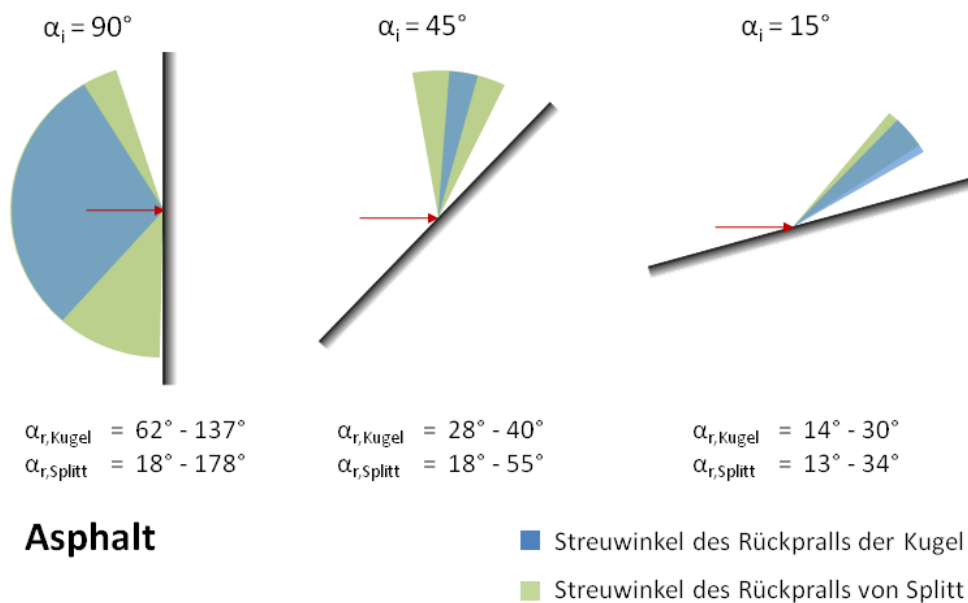
Zusätzlich haben unterschiedliche Bestandteile des Asphalts (Splitt, Bitumen usw.) spezifische Materialeigenschaften, die je nach Stoßpaarung einen anderen Restitutionskoeffizienten aufweisen.

Es konnte jedoch ermittelt werden, dass der normale Restitutionskoeffizient von Asphalt bei niedrigen Geschwindigkeiten maximale Werte bis zu 0,7 annimmt, wohingegen bei hohen Geschwindigkeiten Minimalwerte von ca. 0,1 gemessen werden. Auch der tangentielle Restitutionskoeffizient weist eine große Streuung von  $0.40 \pm 0.20$  durch die raue Oberflächenbeschaffenheit auf.



**Abb. 64** Normaler Restitutionskoeffizient von Asphalt bei einem sphärischen Aufprallkörper aus Keramik

Die raue Oberfläche von Asphalt verursacht auch beim Beschuss mit Splitt große Abweichungen mit maximalen Rückstreufeldern von bis zu  $\pm 90^\circ$  bei einem senkrechten Aufprallwinkel (Abb. 65). Flachere Aufprallwinkel reduzieren die Streufelder.



**Abb. 65** Streuwinkel von aufprallenden Splittsteine auf Asphalt bei 10 m/s



Die Ergebnisse der gesamten Versuchsreihe zeigen sinkende Werte des normalen Restitutionskoeffizienten bei ansteigender Aufprallgeschwindigkeit, was auf eine stärkere plastische Verformung der Materialien zurückzuführen ist. Tangentiale Restitutionskoeffizienten hängen stark von der Oberflächenstruktur ab und zeigen sinkende Werte bei rauen und unebenen Oberflächen. Zusätzliche Untersuchungen mit unterschiedlichen Aufprallmassen bei gleicher Dichte der Projektile haben keinen Einfluss auf den normalen Restitutionskoeffizienten gezeigt [122].

#### 4.3 Analyse von Steinschlagbeschädigungen und induzierter Korrosion mittels Puls-Phasen-Thermographie

Steinschläge verursachen unterschiedliche Defekte in Mono- und Multischichtsystemen, die einen spezifischen thermischen Kontaktwiderstand hervorrufen. Untersuchungen von Defekten mit der Puls-Phasen-Thermographie (PPT) zeigen thermische Rückmeldungen, die durch Amplituden- und Phasenwerte dargestellt werden können. Aus einem Diagramm mit den Achsen der Phase und der Amplitude können spezifische thermische Felder ermittelt werden.

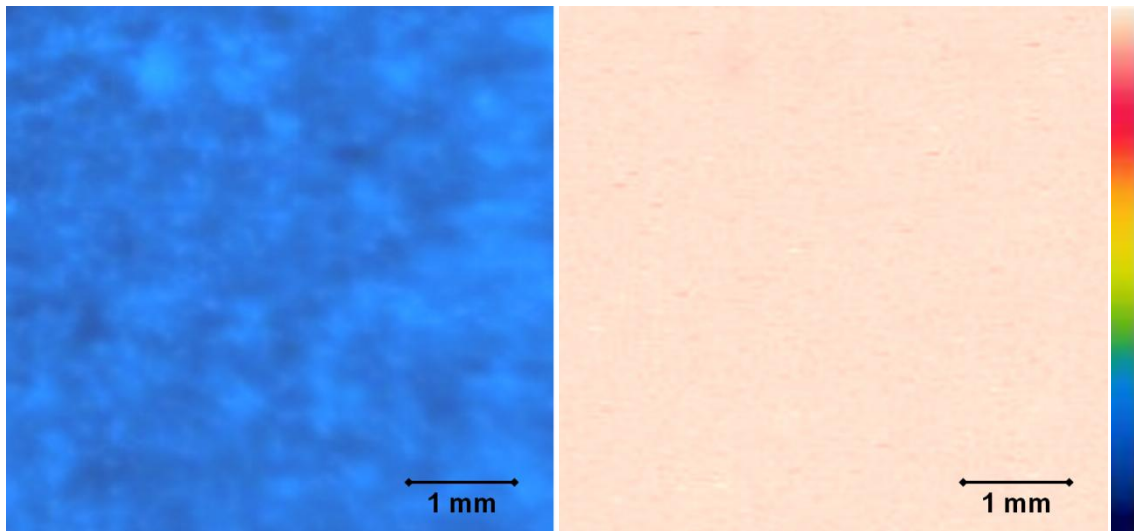
Um von der intakten Beschichtung abweichende thermische Rückmeldungen einem definierten Defekt zuzuordnen, wurden Oberflächen- und zerstörende metallografische Analysen durchgeführt.

Im Folgenden wird auf die thermische Rückmeldung intakter Beschichtungen eingegangen. Nachfolgend werden Defekte an Mono- und Multischichten unterschiedlicher Substrate dargestellt, um diese von der intakten Beschichtung zu differenzieren.

##### 4.3.1 Intakte Beschichtung

Intakte Beschichtungen zeigen eine spezifische thermische Rückmeldung mit Werten der Amplitude und der Phase eines Beschichtungssystems (Abb. 67).

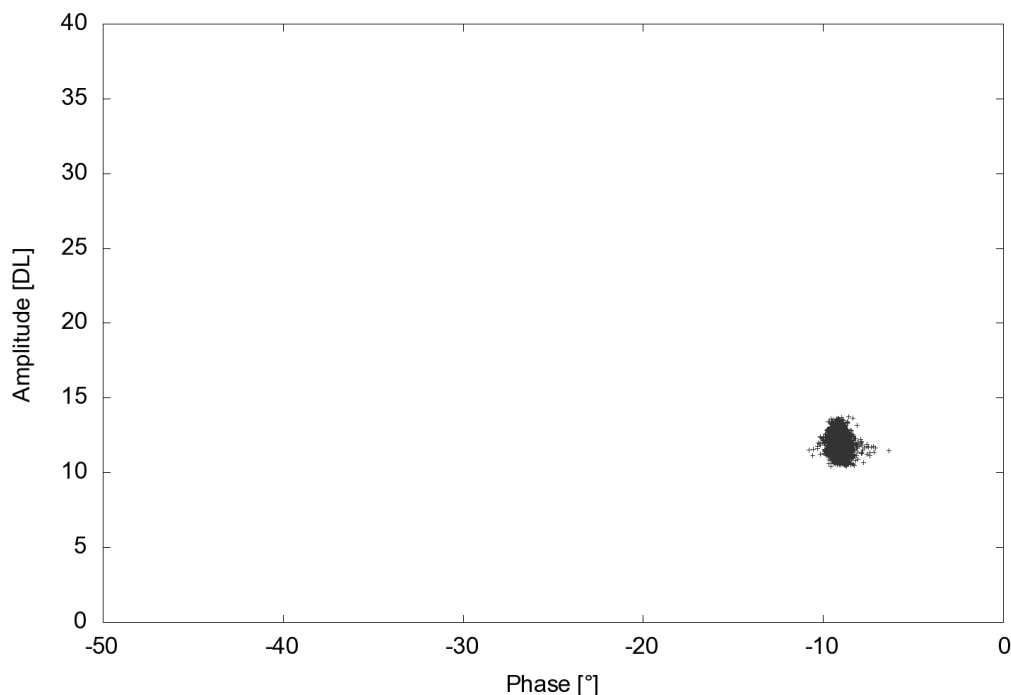




**Abb. 67 Amplituden- (links) und Phasenbild (rechts) einer intakten Beschichtung**

Ein vollständig homogenes System würde nach einer DFT nur einen Amplituden- und einen Phasenwert des gesamten Untersuchungsbereiches aufweisen. Durch die Synchronisation der Blitzlampen mit der Kamera sind Amplituden- und Phasenwerte reproduzierbar einem Beschichtungssystem zuzuordnen.

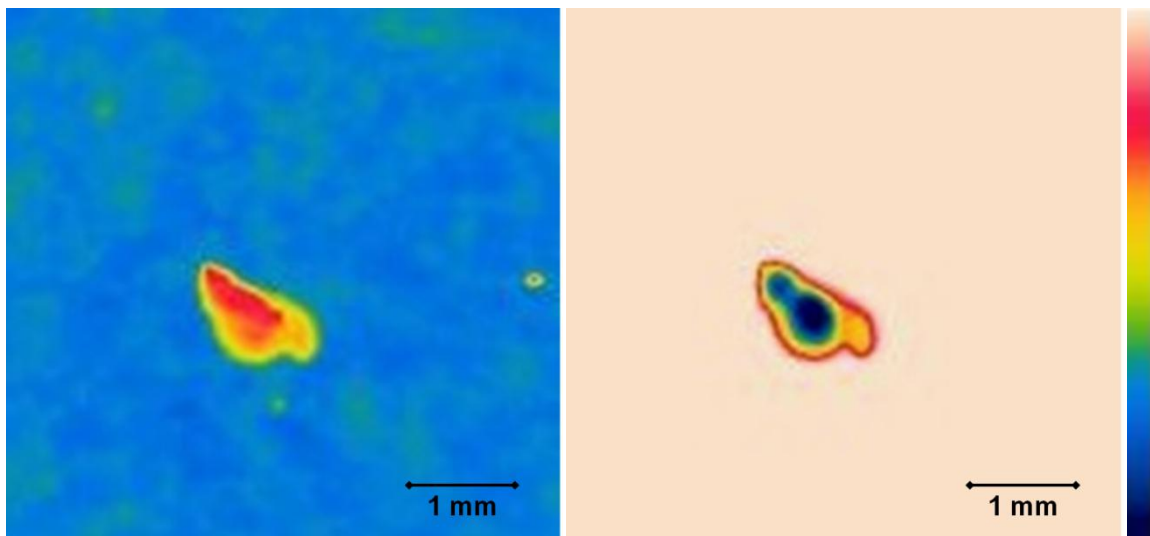
Jedoch haben Beschichtungssysteme eine Schichtdickenvariation, was zu einer Abweichung der Phasenwerte führt. Auch Blitzlampen können keine ideal homogene Erwärmung der Probe hervorrufen, was sich durch eine Abweichung bei den Amplitudenwerten zeigt. Diese Abweichungen werden aus dem Amplituden-Phasen-Diagramm (Abb. 68) durch eine Punktwolke ersichtlich [119].



**Abb.68 Verteilung des thermischen Signals eines intakten Beschichtungssystems**

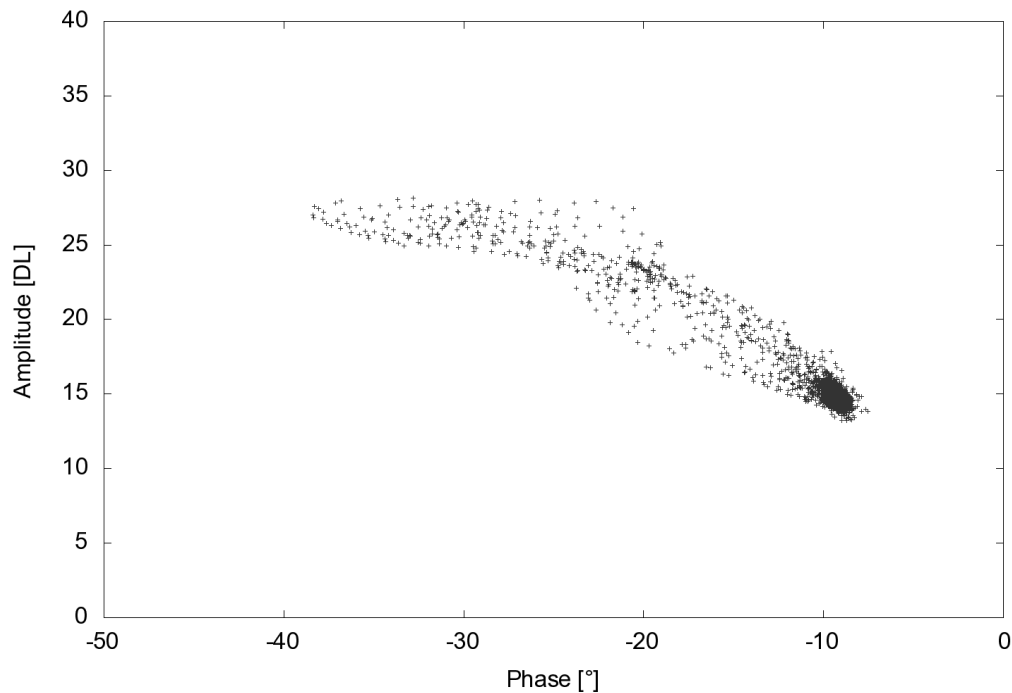
### 4.3.2 Defekte an Monoschichtsystemen

Nach einer Steinschlagbelastung entstehen an Defektstellen unterschiedliche thermische Rückmeldungen. Bei der Analyse von Amplituden- und Phasenwerten einer Probe mit einer Monoschicht (KTL) konnten nach einer Steinschlagbelastung (Projektile Splitt, Prüfung Monosteinschlagprüfung) zwei unterschiedliche Signale ermittelt werden. Einer der Defekte wird durch steigende Amplitudenwerte und einen steigenden Wert des absoluten Betrages der Phasenverschiebung angezeigt (Abb. 69).



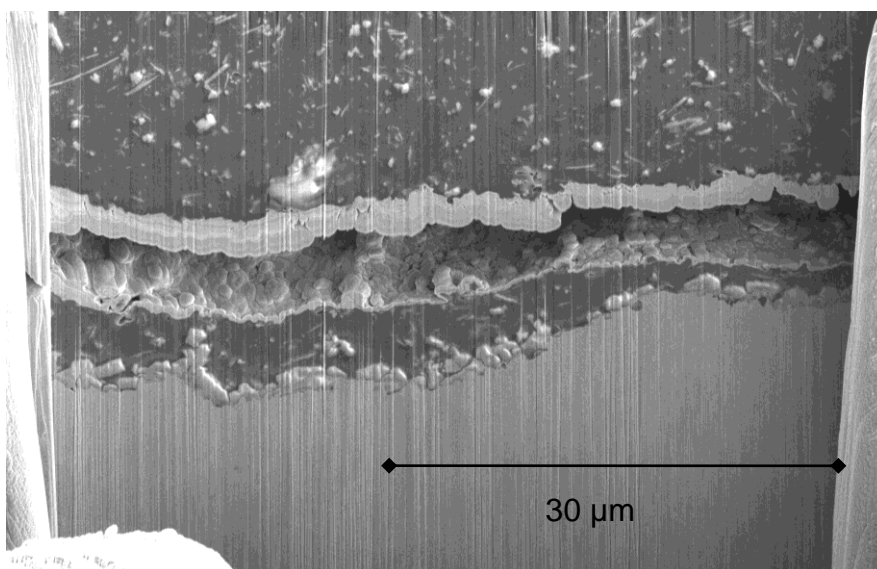
**Abb. 69 Amplituden- (links) und Phasenbild (rechts) einer Delamination der Beschichtung**

Abbildung 70 zeigt ein typisches Diagramm der Verteilung der thermischen Rückmeldung von Amplituden- und Phasenwerten. Der Bereich mit der dichtesten Verteilung der Punkte entspricht der intakten Beschichtung, wohingegen abweichende Werte mit den oben genannten Veränderungen den Defekt beschreiben. Diese thermische Rückmeldung zeigt einen Abbruch des thermischen Wärmeflusses durch einen hohen thermischen Kontaktwiderstand, der durch eine Delamination der Beschichtung verursacht wird. Die Folge sind steigende Amplitudenwerte sowie steigende absolute Beträge der Phasenverschiebung, da der Wärmefluss in das Substrat behindert ist und sich ein Wärmestau im Beschichtungssystem aufbaut.



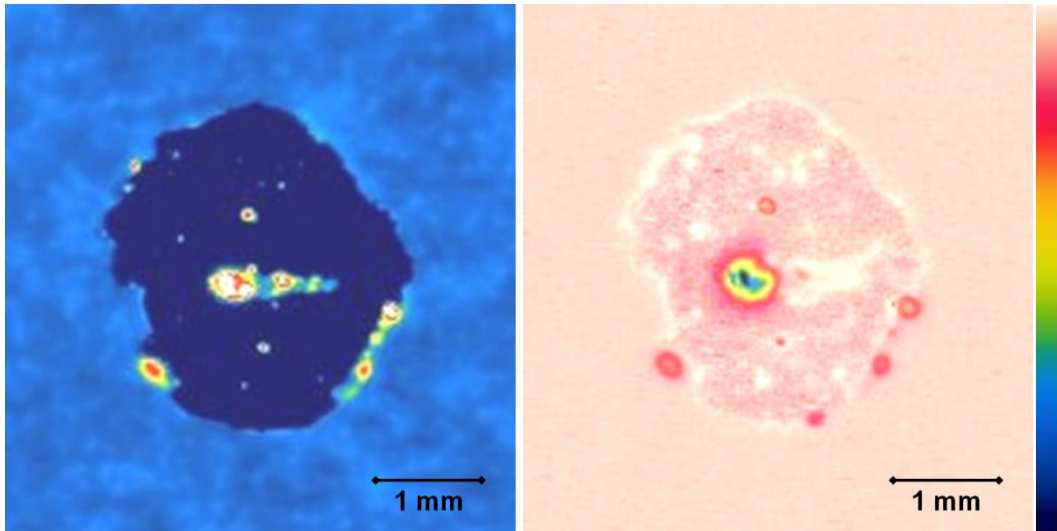
**Abb. 70** Thermische Verteilung von Amplituden- und Phasenwerten einer Delamination

Durch die thermischen Eigenschaften des Defekts kann auf eine Delamination geschlossen werden, was mittels eines FIB-Schnitts am Defekt verifiziert wurde. Ergebnisse aus den Untersuchungen des Querschnittes haben eine Delamination durch einen kohäsiven Bruch der Beschichtung gezeigt (Abb. 71).



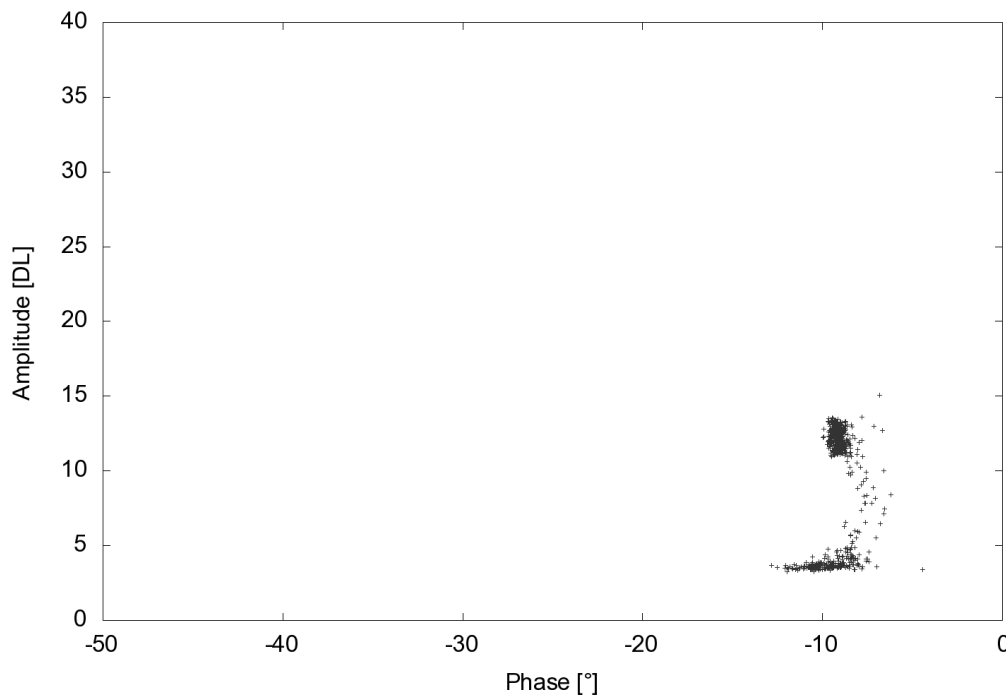
**Abb. 71** FIB-Schnitt eines Defektes mit erhöhten Amplitudenwerten und absoluten Beträgen des Phasenwertes zeigen eine Delamination der Schicht

Das zweite thermische Signal einer Einzelmessung eines Defektes einer Monoschicht ist durch abnehmende Amplitudenwerte und eine geringe Veränderung des Phasenwertes charakterisiert (Abb. 72).

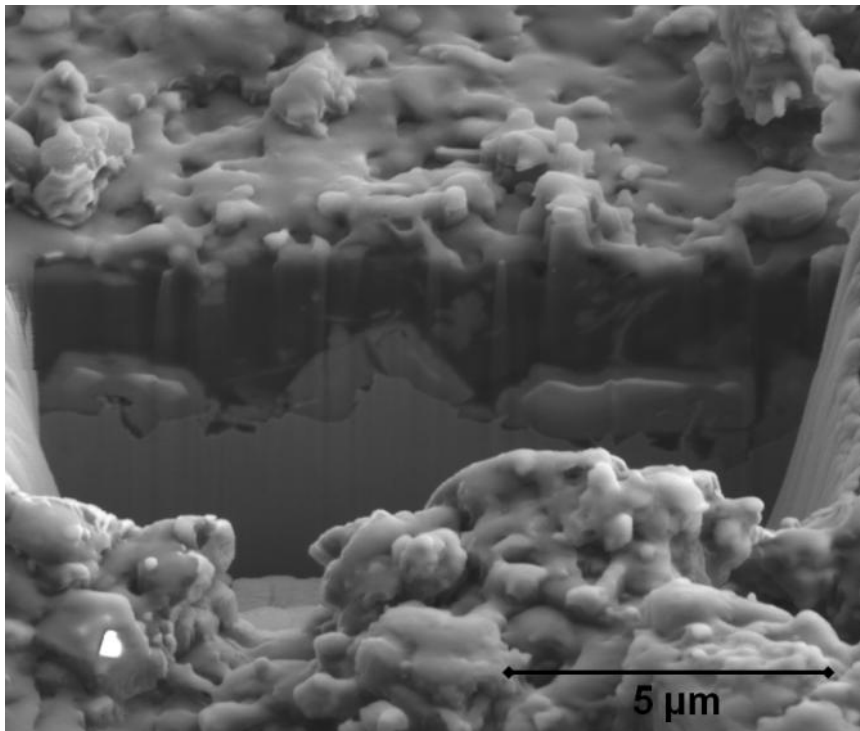


**Abb. 72 Amplituden- (links) und Phasenbild (rechts) einer Schichtdickenreduzierung**

Für ein besseres Verständnis werden thermische Rückmeldungen der Delamination in der Defektmittle und am Defektrand in der Verteilung des gesamten thermischen Signals nicht angezeigt (Abb. 73).



**Abb. 73 Thermische Signale einer Schichtdickenreduzierung (Delaminationen in Defektmittle und -rand werden nicht angezeigt)**



**Abb. 74 FIB-Schnitt durch einen Defekt mit niedrigen Amplitudenwerten zeigt einen Kohäsionsbruch der Beschichtung**

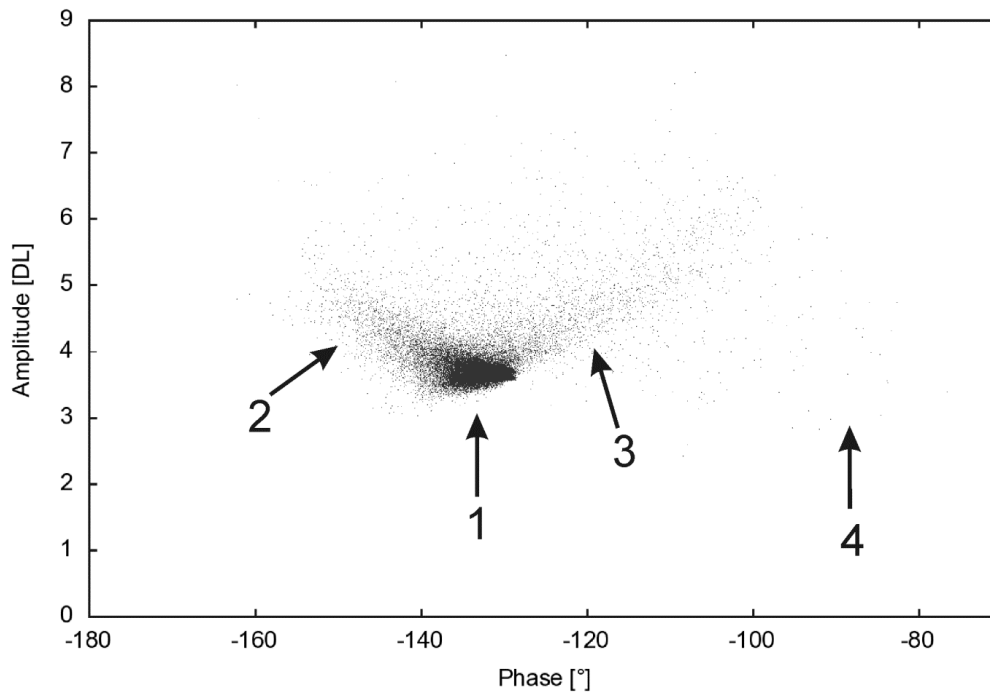
Das Signal dieses Defektes zeigt einen Wärmefluss, der schnell in das Substrat abfließen kann und sinkende Amplitudenwerte hervorruft. Aus der thermischen Rückmeldung kann auf eine Verringerung der Schichtdicke geschlossen werden. Jedoch zeigen Amplituden- und Phasenwerte keinen freien Wärmefluss in das Substrat, sondern einen geringer werdenden thermischen Kontaktwiderstand.

Zerstörende Analysen (FIB-Schnitt) zeigen einen Kohäsionsbruch und Verlust der Beschichtung. Durch die intakte Polymer-Substrat-Phasengrenze der Restschicht wird ein geringer thermischer Kontaktwiderstand erzeugt. Dieser Widerstand differenziert die thermische Rückmeldung gegenüber blanken Oberflächen [119, 120].

#### 4.3.3 Defekte an Multischichtsystemen auf unterschiedlichen Substraten

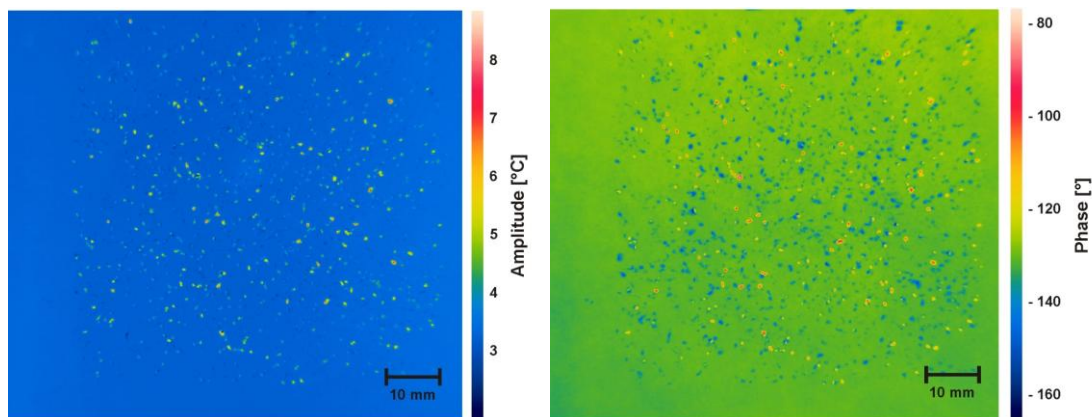
##### 4.3.3.1 Multischichten auf Aluminiumsubstraten

Schichtsysteme auf Aluminium zeigen nach einer Multisteinschlagbelastung (Prüfkörper Splitt, Multisteinschlagprüfung) spezifische Defekte, die durch unterschiedliche thermische Rückmeldungen in einem Amplituden-Phasen-Diagramm angezeigt werden können (Abb. 75). Diese werden durch die große Anzahl aufprallender Steine erzeugt.



**Abb. 75** Verteilung der thermischen Rückmeldung (vier Bereiche) von Phase und Amplitude einer Multischicht auf Aluminium mit Steinschlagdefekten

Abbildung 76 zeigt ein Amplituden- und ein Phasenbild der gesamten Probenfläche nach einer Multisteinschlagbelastung.



**Abb. 76** Amplituden- (links) und Phasenbild einer Probe nach einem Multisteinschlagtest

Die vier verschiedenen thermischen Rückmeldungen werden mit einem thermischen Linienscan analysiert, um das Signal einzelner Defekte im Detail darzustellen. Durch die Analyse der vier thermischen Rückmeldungen der Amplitude und Phase ist es möglich diese mit spezifischen Defekten zu korrelieren. Das Signal 1 (Abb. 75) zeigt eine Anhäufung thermischer Signale mit kleinen Abweichungen der Werte und wurde vor den Steinschlagbeschädigungen am intakten Beschichtungssystem ebenfalls gemessen. Das thermische Signal der intakten Beschichtung stellt eine Referenz zu abweichenden thermischen Rückmeldungen von Defekten da.

Signale aus dem Bereich 2 (Abb. 75) mit ansteigenden Amplituden und steigenden absoluten Beträgen der Phasenverschiebung weichen vom intakten Signal ab und zeigen einen Defekt (Abb. 77).

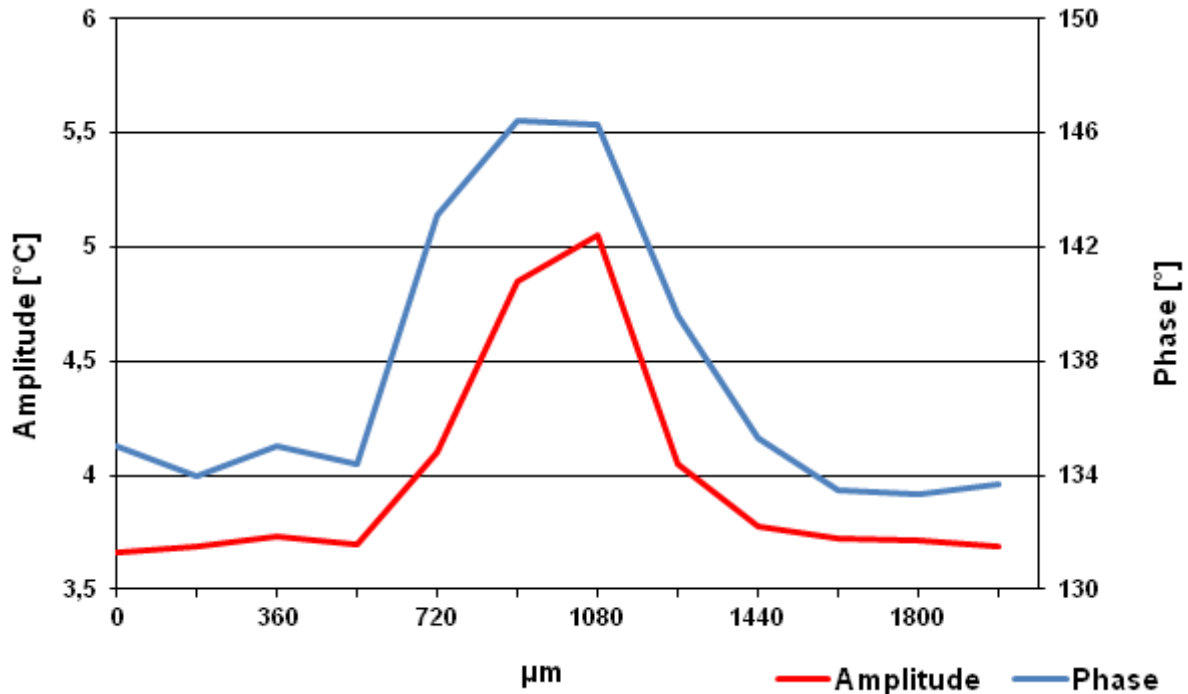


Abb. 77 Thermische Linienanalyse des Defektes (Signal 2)

Diese Werte lassen auf einen Abbruch des Wärmeflusses schließen und erzeugen einen Wärmestau im Schichtsystem, was bereits bei Delaminationen von Monoschichten ermittelt wurde. Oberflächenanalysen in einem Linientopographiebild zeigen eine Abhebung der Beschichtung. Ein zusätzliches Schliffbild zeigt einen Adhäsionsbruch zwischen Basislack und Füller, der einen hohen thermischen Kontaktwiderstand erzeugt (Abb. 78).

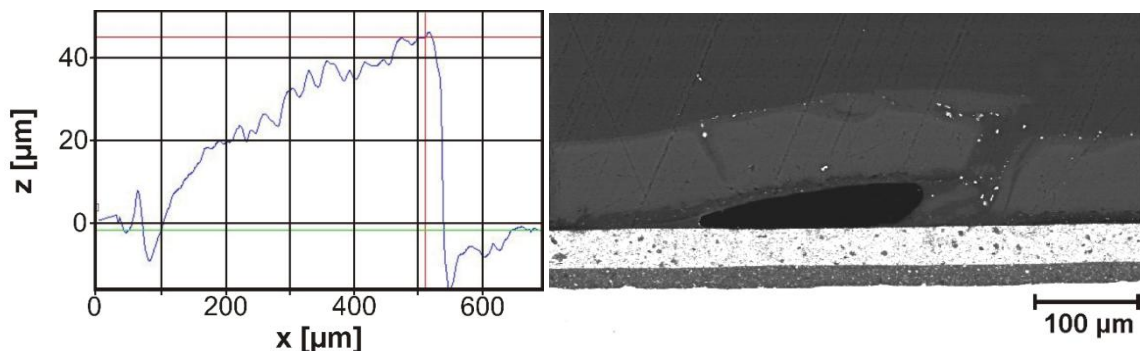


Abb. 78 Linientopographie der Oberfläche (links) und Schliffbild (rechts) des Signals 2

Vergleichbare thermische Signale anderer Oberflächendefekte zeigten nach einer Oberflächen- und Schliffbildanalyse ebenfalls eine Delamination der Beschichtung zwischen Basislack und Füller.

Signale aus dem Bereich 3 (Abb. 75) werden durch steigende Amplituden- und sinkende absolute Beträge von Phasenwerten verglichen mit dem Referenzpunkt der intakten Beschichtung angezeigt. In Abbildung 79 ist eine thermische Linienanalyse des Defekts ersichtlich (Signal 3).

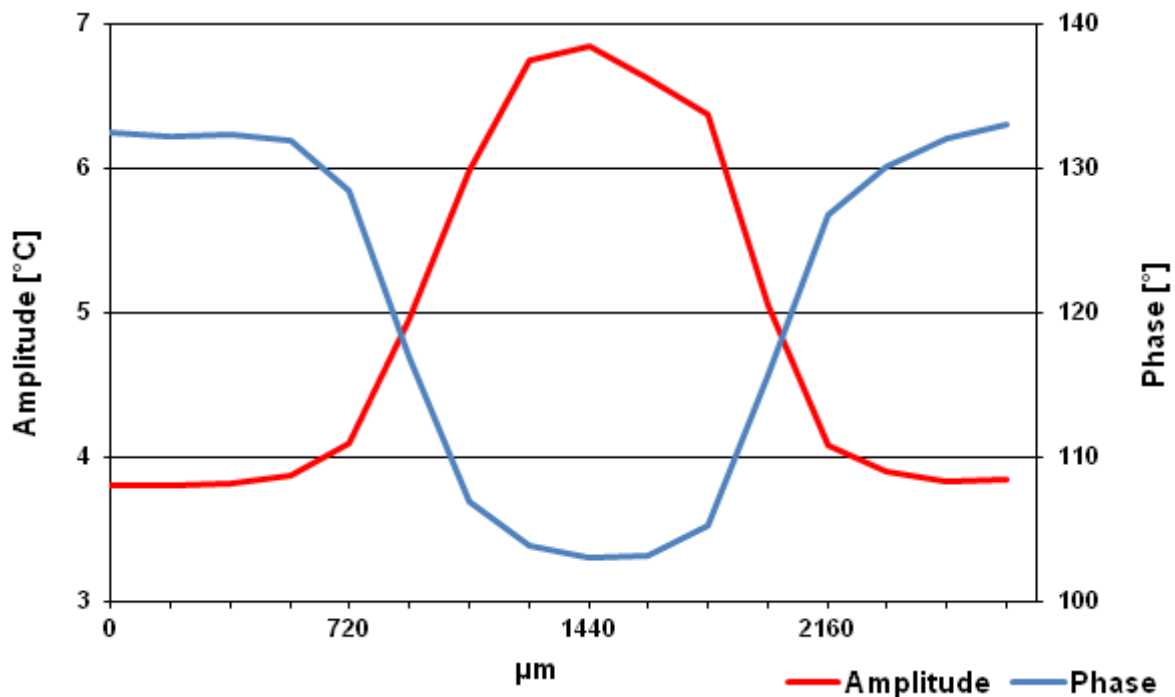


Abb. 79 Thermische Linienanalyse des Defektes (Signal 3)

Oberflächen- und Schliffbildanalysen dieses Defektes weisen auf einen Schichtverlust des Basis- und des Klarlacks hin (Abb. 80).

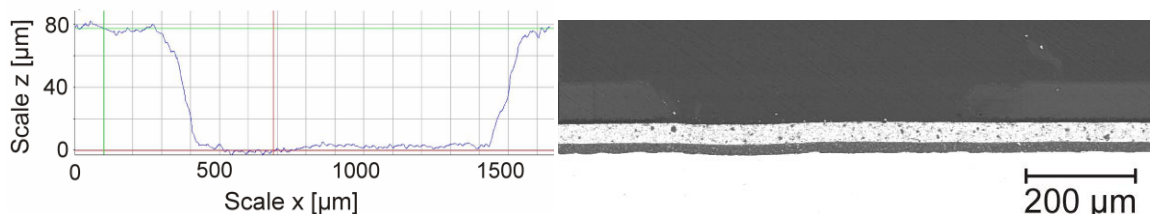


Abb. 80 Linientopographie der Oberfläche (links) und Schliffbild (rechts) des Signals 3

Thermische Rückmeldungen des Signals 3 mit ansteigenden Amplituden- und sinkenden absoluten Beträgen von Phasenwerten im Vergleich zur intakten Beschichtung können mit einem Schichtverlust von Basis- und Klarlack korreliert werden.



Durch den Schichtverlust und ein schnelleres Abfließen der Wärme in das Substrat sinken die absoluten Beträge der Phasenverschiebung. Jedoch zeigt der Füller, der sich an der Oberfläche befindet, durch seine Effusivität erhöhte Amplitudenwerte. Durch die thermischen Eigenschaften der Oberflächenschicht können vor allem Amplitudenwerte beeinflusst werden.

Das Signal 4 mit wenigen thermischen Rückmeldungen der Probe zeigt eine Verringerung absoluter Beträge der Phasenverschiebung und der Amplitude (Abb. 81).

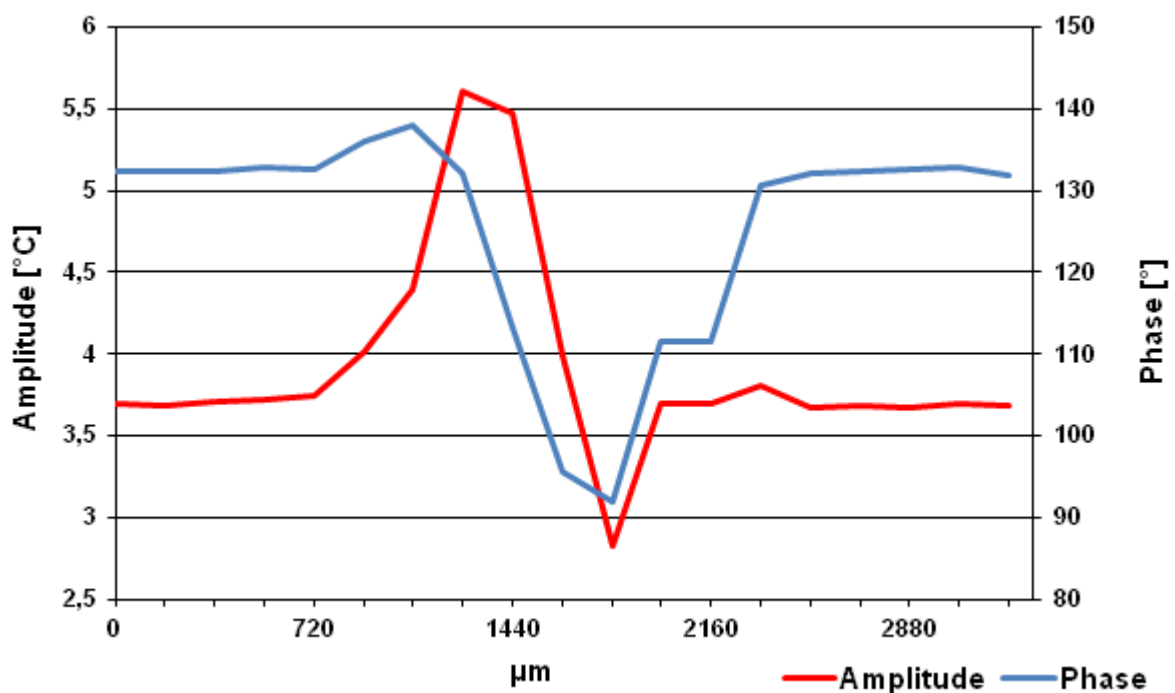


Abb. 81 Thermische Linienanalyse des Defektes (Signal 4)

Die Kombination dieser beiden Wertänderungen deutet auf ein schnelles Abfließen thermischer Wellen in das Substrat hin. Mit Hilfe von Oberflächen- und Schlibbildanalysen konnte ein vollständiger physikalischer Verlust des Schichtsystems ermittelt werden (Abb. 82). Blanke Bereiche der Probe verursachen den geringen thermischen Kontaktwiderstand und erzeugen sinkende Amplituden- und absolute Beträge von Phasenwerten.

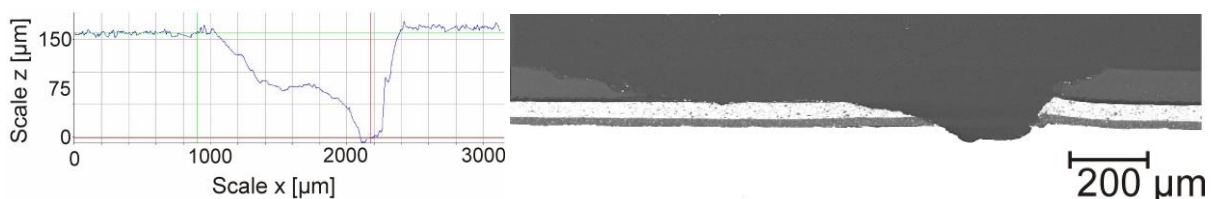
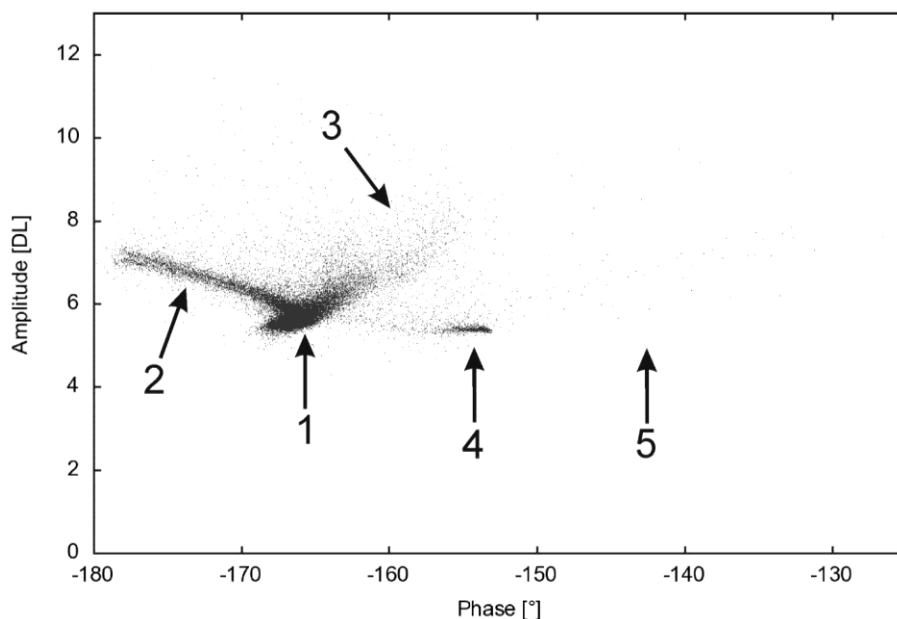


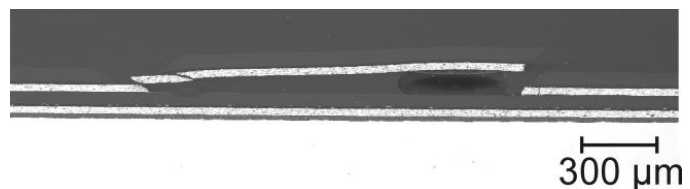
Abb. 82 Linientopographie der Oberfläche (links) und Schlibbild (rechts) des Signals 4

Um die thermischen Rückmeldungen der Defekte der Delamination und des Schichtverlustes zu untersuchen, eignet sich eine doppelt beschichtete Probe mit ansonsten unüblichem Reparaturaufbau, da sich die Schichten sauber voneinander trennen und das thermische Signal geringen Störgrößen ausgesetzt ist. Darum wurde im nächsten Schritt eine Doppelbeschichtung untersucht. Ergebnisse mit der PPT zeigen große Bereiche von Delamination und Schichtverlust mit gering abweichenden thermischen Rückmeldungen. Aus dem Amplituden-Phasen-Diagramm sind diese spezifischen thermischen Rückmeldungen ersichtlich, wobei sich die Signale in fünf Bereiche separieren lassen (Abb. 83).



**Abb. 83** Verteilung der thermischen Rückmeldung (fünf Bereiche) von Phase und Amplitude einer doppelten Multischicht auf Aluminium mit Steinschlagdefekten

Der Bereich 1 zeigt das intakte Beschichtungssystem, wohingegen Signal 2 auf eine Delamination hindeutet (Abb. 83). Durch die schwache Adhäsion zwischen



**Abb. 84** Schliffbild des Signals 2

Füller und Klarlack zeichnet sich eine komplette Delamination der Schicht ab (Abb. 84), was ein klares thermisches Signal liefert (Abb. 85).

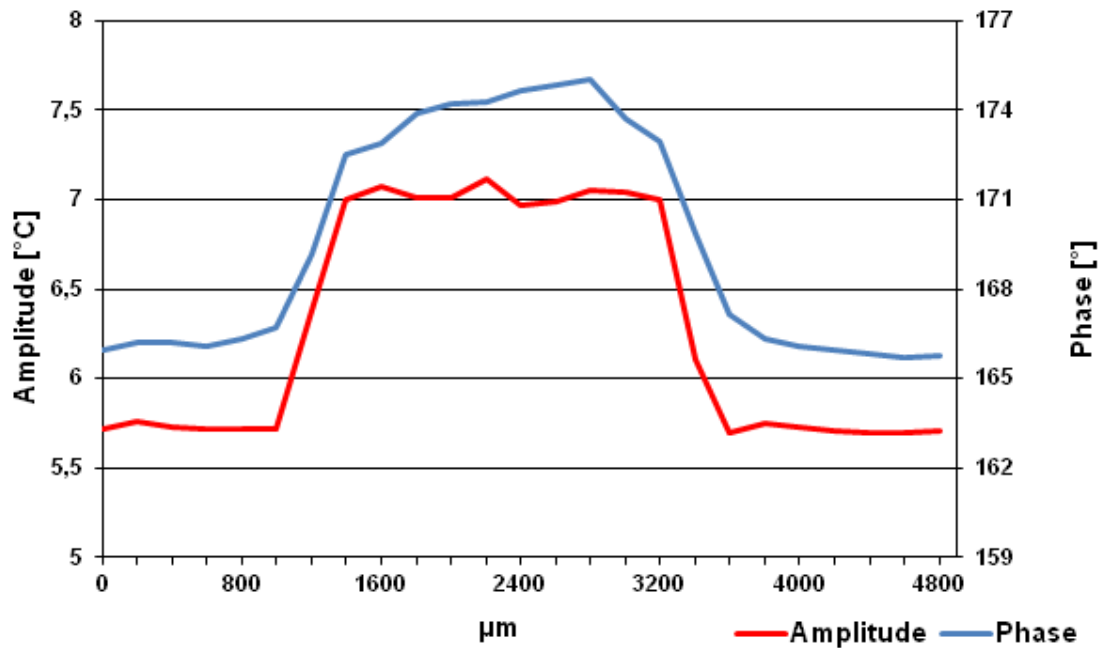


Abb. 85 Thermische Linienanalyse des Defektes (Signal 2)

Signal 4 zeigt einen spezifischen Defekt mit sinkenden absoluten Beträgen der Phase und der Amplitude (Abb. 86). Bei dieser Punktwolke handelt es sich um eine charakteristische Multischicht (einfach beschichtet) auf Aluminium. Die zweite Multischicht ist vollständig abgeplatzt. Oberflächen- und Schliiffbildanalysen zeigen den Schichtverlust eines kompletten Multischichtsystems (Klarlack, Basislack, Füller) (Abb. 87) [118].

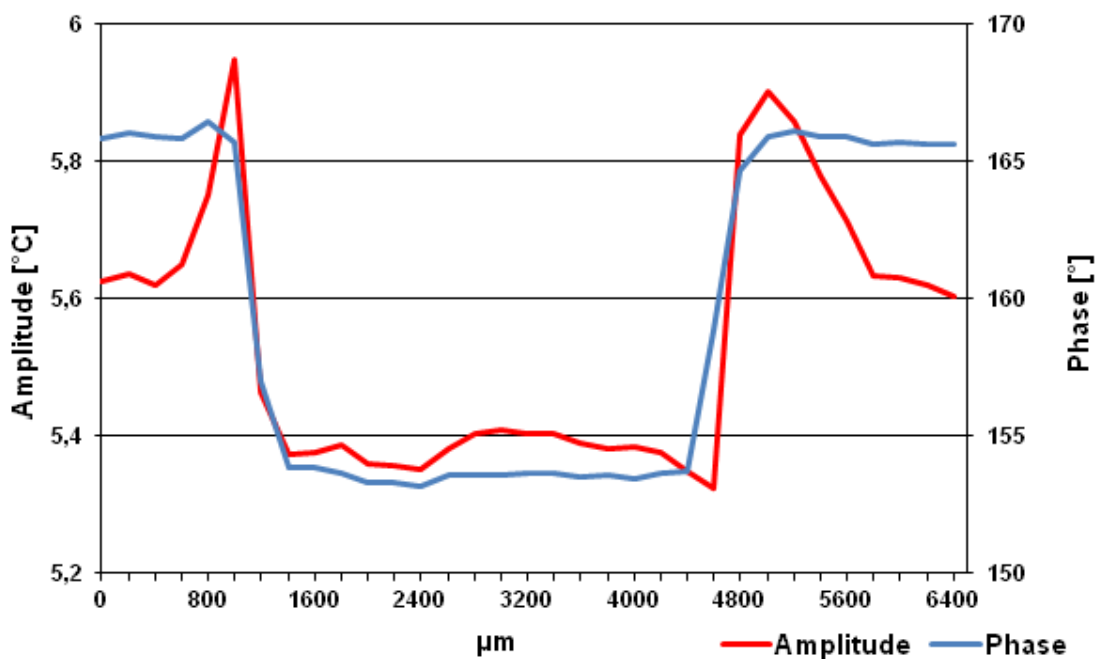


Abb. 86 Thermische Linienanalyse des Defektes (Signal 4)



Abb. 87 Schliffbild des Signals 4

#### 4.3.3.2 Multischichtsysteme auf Stahlsubstraten

Die thermischen Rückmeldungen von Multischichten auf Stahl sind mit denen auf Aluminium vergleichbar. Die Effusivität von Stahl ist durch eine höhere Dichte, eine geringere Wärmekapazität und eine geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Aluminium charakterisiert. Hierbei ist die Effusivität von Stahl etwas geringer als die von Aluminium, jedoch ist die Reflektionsrate thermischer Wellen vor allem von dem Unterschied der Effusivitäten des Grundmaterials und der Beschichtung abhängig, was eine Vergleichbarkeit der Substrate ermöglicht.

Durch Eigenschaftsunterschiede eines Multischichtsystems entstehen andere Defekte, die bei einer thermischen Analyse ersichtlich werden. Bei der Multischicht auf Stahl können drei verschiedene Signale ermittelt werden.

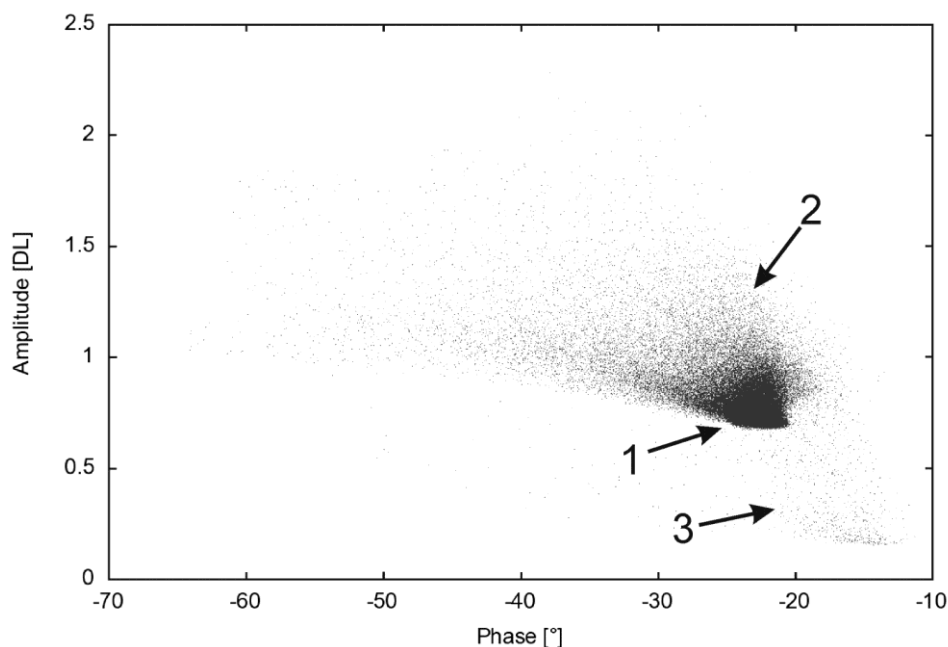


Abb. 88 Verteilung der thermischen Rückmeldung (3 Bereiche) von Phase und Amplitude einer Multischicht auf Stahl mit Steinschlagdefekten

Signal 1 zeigt wieder das intakte Beschichtungssystem. Signal 2 mit steigender Amplitude und absoluten Beträgen der Phase ist vergleichbar mit den Ergebnissen von Beschichtungssystemen auf Aluminium und deuten auf eine Delamination. Signale aus dem Bereich 3 weisen sinkende Amplituden- und absolute Beträge der Phase auf (Abb. 89).

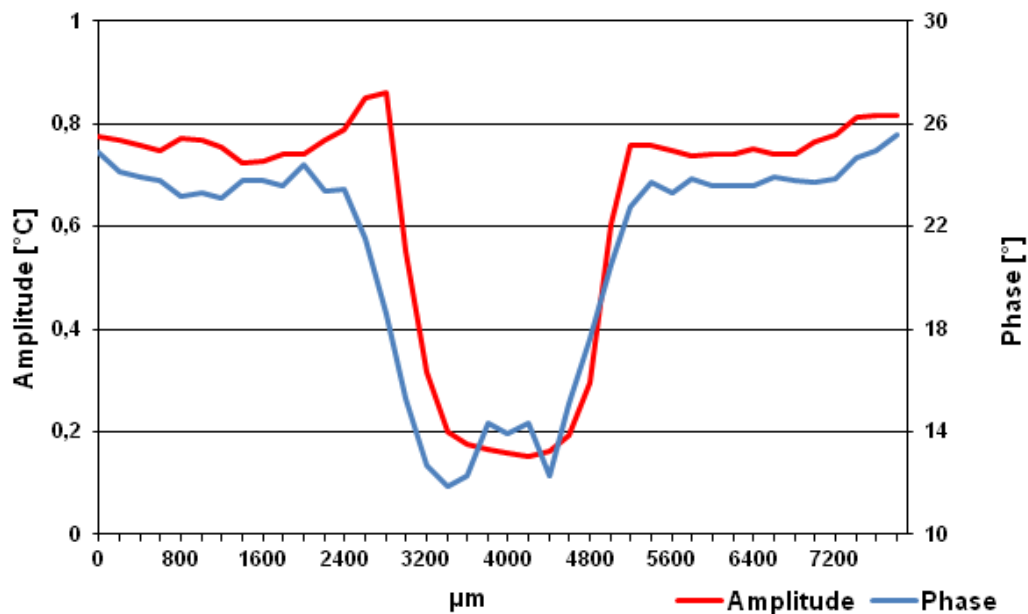
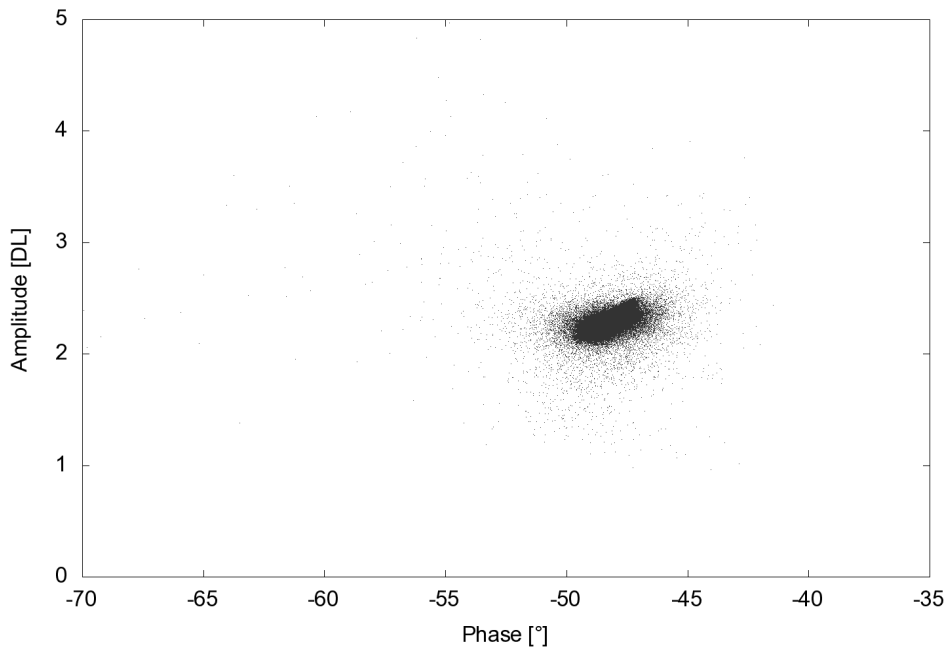


Abb. 89 Thermische Linienanalyse des Defektes (Signal 3)

Eine Schlibbildanalyse hat einen Schichtverlust bis zur KTL-Schicht ergeben. Hierbei variieren Werte der Amplitude und der Phase durch Reste des Füllersystems, die sich auf der KTL-Schicht befinden [118].

#### 4.3.3.3 Multischichtsysteme auf Polypropylensubstraten

Thermische Analysen des Beschichtungssystems auf Polypropylen zeigen eine undefinierte thermische Rückmeldung, die durch vergleichbare thermische Eigenschaften (Effusivität) des Beschichtungssystems und des Substrates hervorgerufen wird.



**Abb. 90** Verteilung der thermischen Rückmeldung von Phase und Amplitude einer Multischicht auf Polypropylen mit Steinschlagdefekten

Mit der PPT untersuchte Defekte zeigen eine abweichende thermische Rückmeldung im Vergleich zu intakten Bereichen. Jedoch kann die Art des Defektes nicht identifiziert werden. Oberflächen und Schliffbildanalysen konnten hierbei nicht dazu beitragen, die thermischen Rückmeldungen der Beschichtung zu interpretieren. Eine Korrelation der thermischen Rückmeldung mit einem Defekt ist in diesem Stadium der Entwicklung für Polypropylen nicht möglich.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass Defekte individuelle thermische Barrieren durch die Entstehung eines thermischen Kontaktwiderstandes erzeugen, die den Wärmefluss beeinflussen. Durch die thermischen Eigenschaften dieser Barrieren können unterschiedliche thermische Rückmeldungen ausgegeben und mit Defekten korreliert werden. Auch eine Reduktion thermischer Barrieren, wie sie durch eine Verringerung oder einen vollständigen Verlust einer Schicht hervorgerufen werden, kann thermisch analysiert werden.

Schichtverlust durch Steinschlag reduziert die Restschichtdicke des Beschichtungssystems und der Wärmefluss kann schneller in das Substrat abfließen. Darum kann ein Schichtverlust mit geringeren absoluten Beträgen der Phasenverschiebung korreliert werden. Die Amplitude hängt vom Wärmefluss im Material und der Effusivität der Oberflächenschicht ab. Steigende Amplituden- und absolute Beträge von Phasenwerten deuten auf einen hohen thermischen Widerstand hin, der den Wärmefluss im

Material unterbricht. Diese thermischen Rückmeldungen lassen auf eine Delamination und gegebenenfalls auf Adhäsionsprobleme eines Beschichtungssystems schließen.

Jedoch können unterschiedliche Farben und stark reflektierende Oberflächenschichten sich auf die Messung auswirken, indem ein hoher Anteil an Energie der Blitzlampen nicht in das Material gelangt, sondern reflektiert wird. Hierbei erschweren Schichten wie Klarlacke und helle Oberflächen die Untersuchung [118].

#### 4.3.4 Korrosionsfortschritt an Mono- und Duplexschichtsystemen

Mit Hilfe der thermischen Rückmeldung von Proben konnten in den vorangegangenen Kapiteln bereits gute Resultate bei der Analyse von Steinschlagbeschädigungen dokumentiert werden. Korrosionsprodukte ändern im Vergleich zum Ausgangszustand ihre materialspezifischen und thermischen Eigenschaften. Dadurch wird ein unterschiedlicher Reflektionskoeffizient von thermischen Wellen durch die unterschiedliche Effusivität der Materialien gemessen. Zusätzlich zu der thermischen Änderung der Materialeigenschaften verursacht Korrosion eine Delamination der Polymerbeschichtung an der Polymer-Substrat-Grenzfläche, die einen thermischen Kontaktwiderstand erzeugt, der den Wärmefluss in das Substrat behindert. Dadurch können unterschiedliche Korrosionserscheinungen detektiert und zerstörungsfrei verfolgt werden.

An einem Anritze einer verzinkten Stahlprobe mit einer KTL-Beschichtung kann nach einer Korrosionsbelastung der Korrosionsfortschritt mit PPT ermittelt werden (Abb. 91).

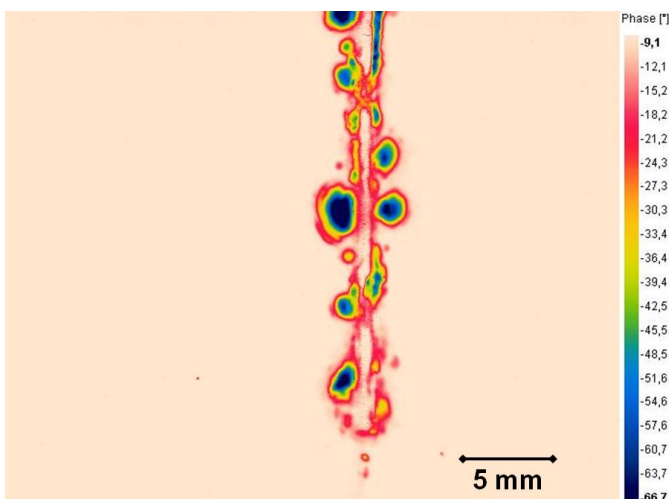
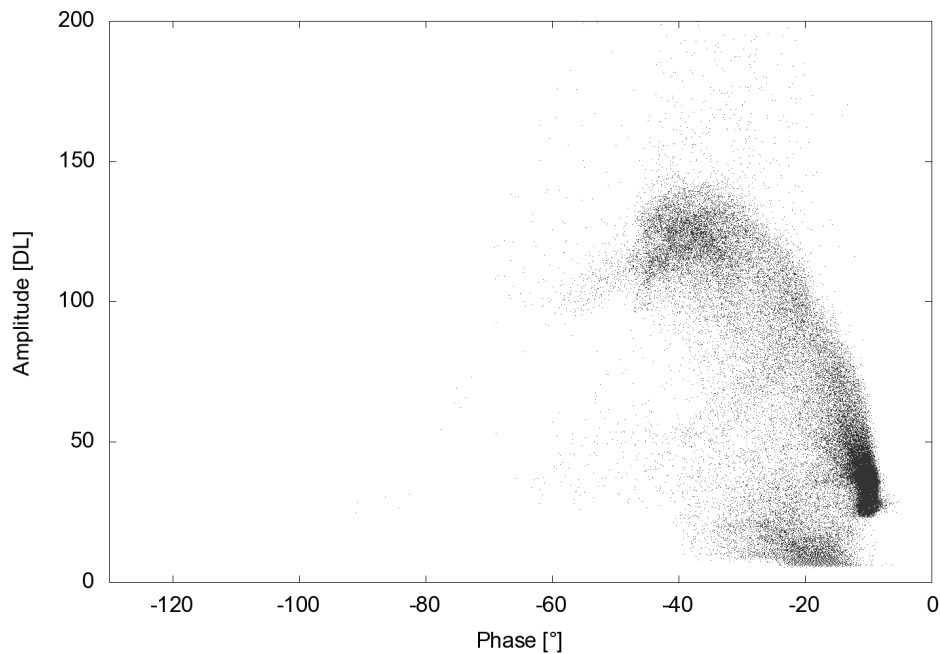


Abb. 91 Phasenbild eines Anritzes auf einer Probe nach korrosiver Auslagerung

Das folgende Phasen-Amplituden-Diagramm (Abb. 92) zeigt die thermische Auswertung der Oberfläche der gesamten Probe.



**Abb. 92** Verteilung der thermischen Rückmeldung von Phase und Amplitude nach einer korrosiven Auslagerung

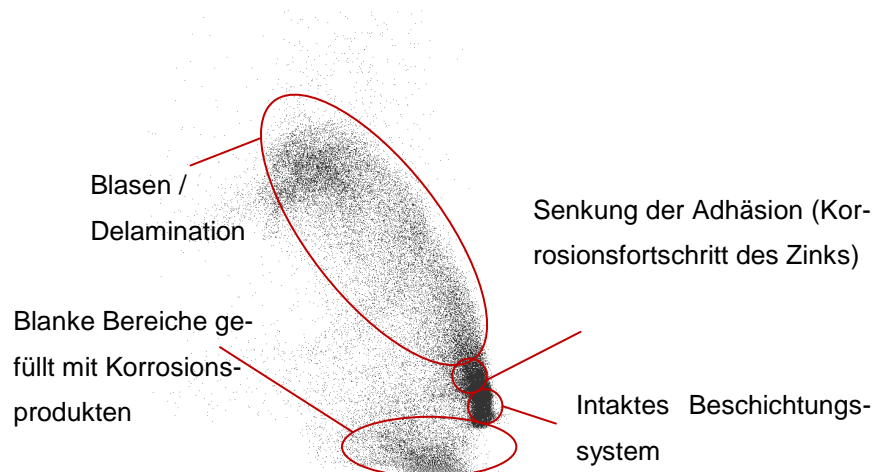
Dadurch können unterschiedliche thermische Effekte den Korrosionsfortschritt, die Blasenbildung und korrodierte blanke Stellen am Anritz aufzeigen. Durch Referenzwerte der intakten Beschichtung können Abweichungen thermischer Größen spezifischen Defekten zugeordnet werden.

Die thermischen Eigenschaften, angezeigt durch Amplituden- und Phasenwerte, hängen vor allem von der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Substrat ab.

Dabei weisen steigende Amplituden- und steigende absolute Beträge von Phasenwerten auf einen hohen thermischen Kontaktwiderstand hin, der durch Korrosionsprodukte und eine Delamination der Beschichtung verursacht wird. Hohe Amplitudenwerte und Abweichungen der absoluten Phasenverschiebung deuten auf Blasenbildung durch Korrosion hin. Geringe Amplitudenerhöhungen lassen Korrosionsprodukte vermuten, die noch einen Kontakt zur Beschichtung haben, jedoch die Adhäsion schwächen.

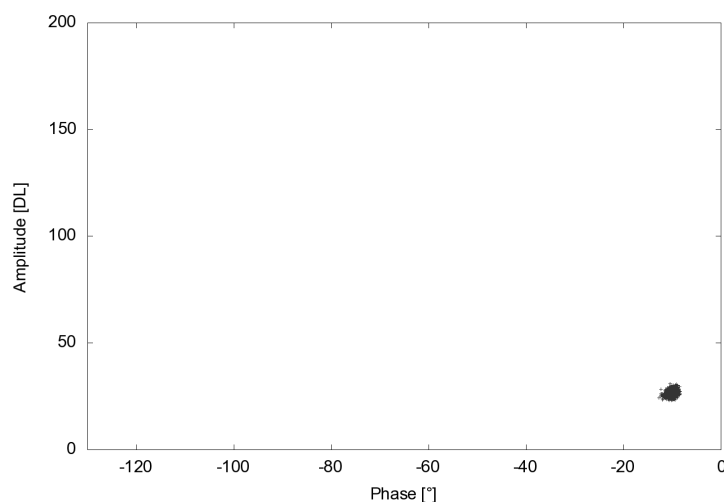
Thermische Rückmeldung aus dem Bereich des Anritzes zeigen geringere Amplitudenwerte, was auf die Effusivität von Korrosionsprodukten zurückzuführen ist, die blanke Stellen füllen (Abb. 93).



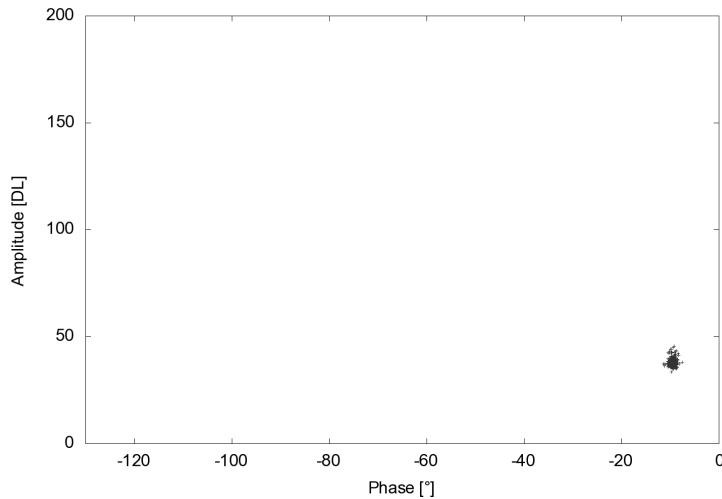


**Abb. 93** Beschreibung der thermischen Rückmeldung von Phase und Amplitude nach einer korrosiven Auslagerung

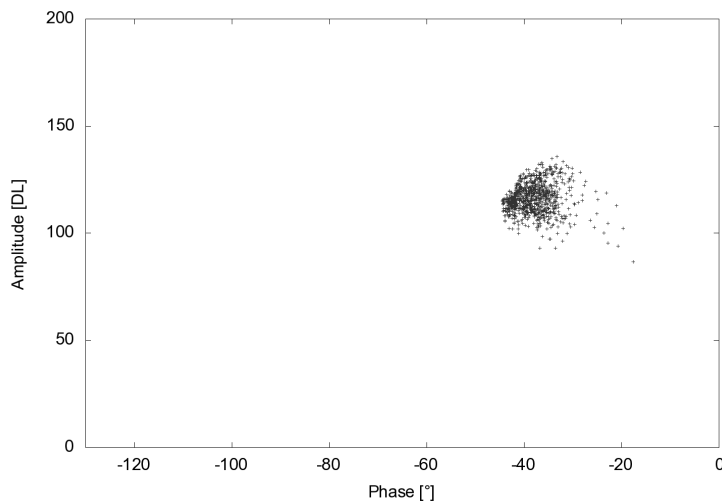
Eine Analyse einzelner Probenbereiche hat gezeigt, dass das Signal des Korrosionsfortschritts vom thermischen Signal intakter Beschichtungen (Abb. 94a) differenziert werden kann. Der nicht sichtbare Korrosionsfortschritt der Zinkschicht unter der Beschichtung konnte durch steigende Amplitudenwerte (Abb. 94b) ermittelt werden. Blasenbildung zeigt einen höheren thermischen Kontaktwiderstand, der durch stark ansteigende Amplitudenwerte und absolute Beträge der Phasenverschiebung beschrieben werden kann (Abb. 94c).



**Abb. 94a** Amplituden-Phasen-Diagramm des intakten Beschichtungssystems



**Abb. 94b Amplituden-Phasen-Diagramm von Zinkkorrosionsprodukten unter Beschichtungen**

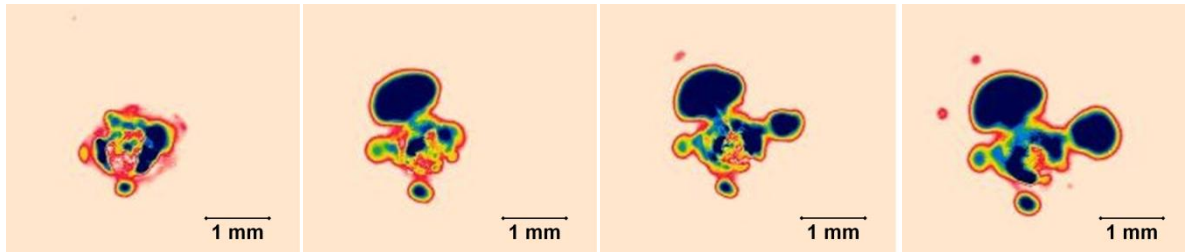


**Abb. 94c Amplituden-Phasen-Diagramm einer Blase**

Eine thermische Analyse des Korrosionsfortschritts kann während eines Korrosionstests durchgeführt werden, indem die Probe nach jedem Zyklus untersucht wird. Abbildung 95 zeigt Phasenbilder des Korrosionsfortschritts mit Blasenbildung (vier Zyklen Korrosionswechseltest). Die Blasenbildung kann im Detail analysiert und nicht sichtbare Korrosion unter Beschichtungen detektiert werden.

Das erste Bild zeigt die Steinschlagbeschädigung ohne einen merklichen Korrosionsfortschritt an den Randbereichen des Defektes. Im zweiten Zyklus kann bereits eine Blase detektiert werden, die in den folgenden Zyklen nicht weiter wächst. Jedoch kann ein neues Blasenwachstum in einer kurzen Distanz zur Blase beobachtet werden.

Optisch ist das Blasenwachstum erst in einem späteren Stadium zu erkennen. Analysen mit einem 3D-Messtool ermöglichen zwar eine Detektion von Blasen, jedoch beträgt die Messzeit mehrere Minuten.



**Abb. 95** Phasenbilder eines Steinschlagdefekts nach je einem Zyklus Korrosionswechseltest

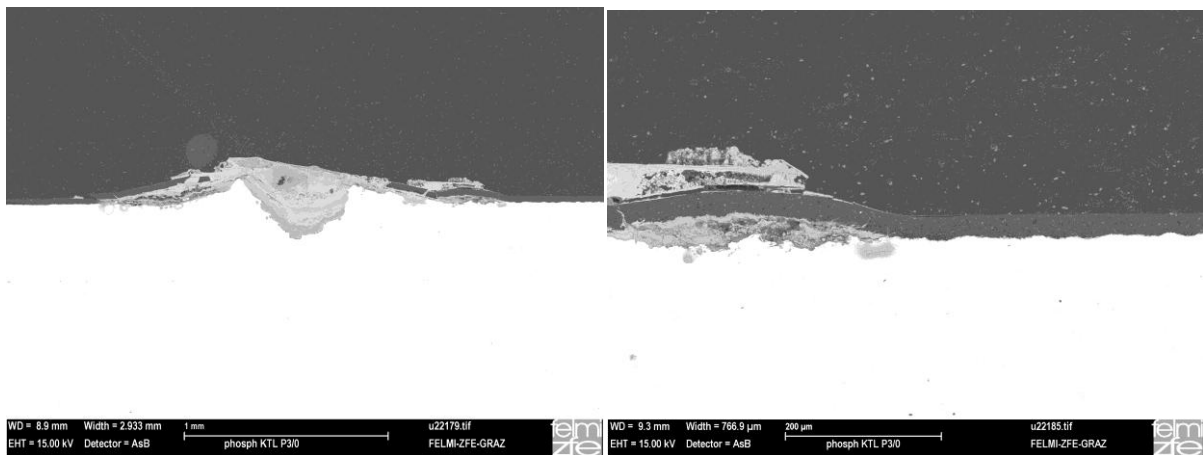
Der Korrosionsfortschritt kann mit Hilfe der Puls-Phasen-Thermographie detektiert und analysiert werden, ohne dass es dadurch zu weiteren Zerstörungen kommt. Die Analysemethoden ermöglichen die Detektion des inhomogenen Blasenbildungsprozesses bereits in einem frühen Korrosionsstadium. Durch die Eigenschaften des Korrosionsfortschritts, der bei organischen Beschichtungen auf Stahl- und verzinkten Stahlsubstraten eine nachlassende Adhäsion bewirkt, kann mit der PPT die Korrosion in einer teilweise indirekten Messung analysiert werden. Zerstörende Analysen durch Schliffbilder und Oberflächenanalysen haben die Ergebnisse der PPT verifiziert [118].

#### 4.4 Korrosionsfortschritt von Proben in Korrosionswechseltests

Untersuchungen von KTL-beschichteten Probeblechen aus blankem und verzinktem Stahl (Z100) zeigen ein spezifisches Korrosionsverhalten in verschiedenen VDA-Korrosionswechseltests (VDA 621-415 und VDA 621-415B). Zum Vergleich des korrosiven Verhaltens von Proben in unterschiedlichen Korrosionswechseltests, wurden die Proben in beiden Tests zehn Zyklen getestet. Im Folgenden wird der Korrosionsverlauf mit Hilfe der Puls-Phasen-Thermographie vorgestellt und durch 3D-Oberflächenmessungen und Schliffbildanalysen das Korrosionsergebnis bewertet.

#### 4.4.1 Unlegierter Stahl mit KTL-Beschichtung

Proben aus Stahl und einer KTL-Beschichtung wurden durch eine Steinschlagbelastung (Prüfkörper aus Stahl) verletzt und im Anschluss in Korrosionstests ausgelagert. Diese weisen nach wenigen Zyklen bereits einen Materialabtrag und eine fortschreitende Delamination ausgehend vom Defekt auf (Abb. 96). Hierbei bilden sich Korrosionsprodukte unter der Beschichtung, die diese anheben.



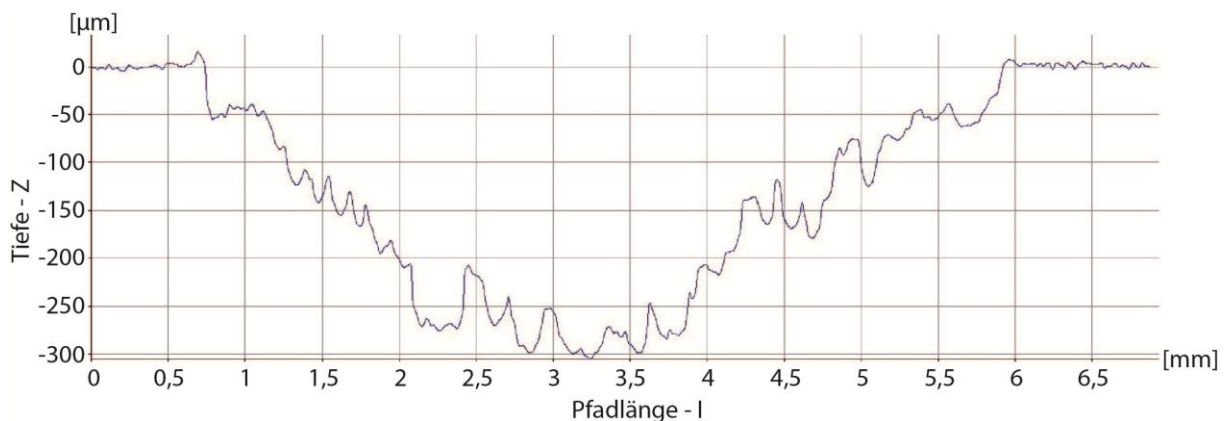
**Abb. 96** Korrosionsfortschritt einer Stahlprobe in einem Korrosionswechseltest (vier Zyklen VDA621-415)

Durch verschiedene Einflussgrößen der Korrosionstests kann der Materialabtrag an den Proben unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Untersuchungen an den Proben wurden durch ein 3D-Messtool vorgenommen, um den Materialabtrag zu ermitteln. Vor der Auslagerung wurde der eingebrachte Defekt mit einem 3D-Messtool vermessen, um das verdrängte Volumen zu bewerten (Abb. 97).



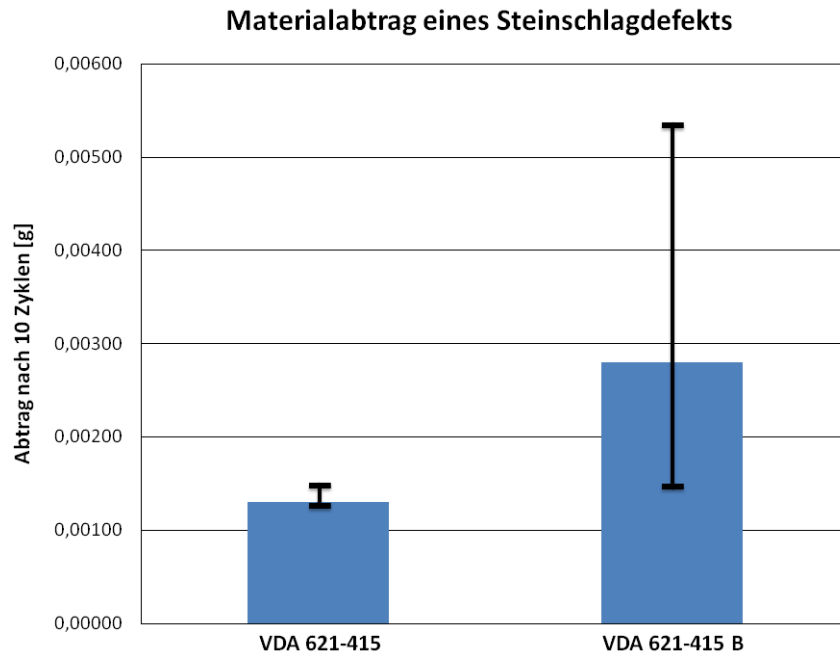
**Abb. 97** Linientopographie durch den Mittelpunkt des eingebrachten Defekts

Durch die Geometrie des Defektes wurde mit der Annahme einer Kugelkalottenform das Volumen zu  $0,042 \text{ mm}^3$  berechnet. Durch den korrosiven Abtrag des Materials hat ein lateraler und vertikaler Verlust des Substrates stattgefunden. Dieser war stärker in lateraler Richtung ausgeprägt, da die Angriffsfläche für das korrosive Medium größer war, als in vertikaler Richtung. Eine Analyse des Materialabtrags nach zehn Zyklen (VDA 621-415 und VDA 621-415B) wurde durch das Abbeizen der Korrosionsprodukte und eine anschließende 3D-Vermessung des abgetragenen Volumens durchgeführt (Abb. 98).



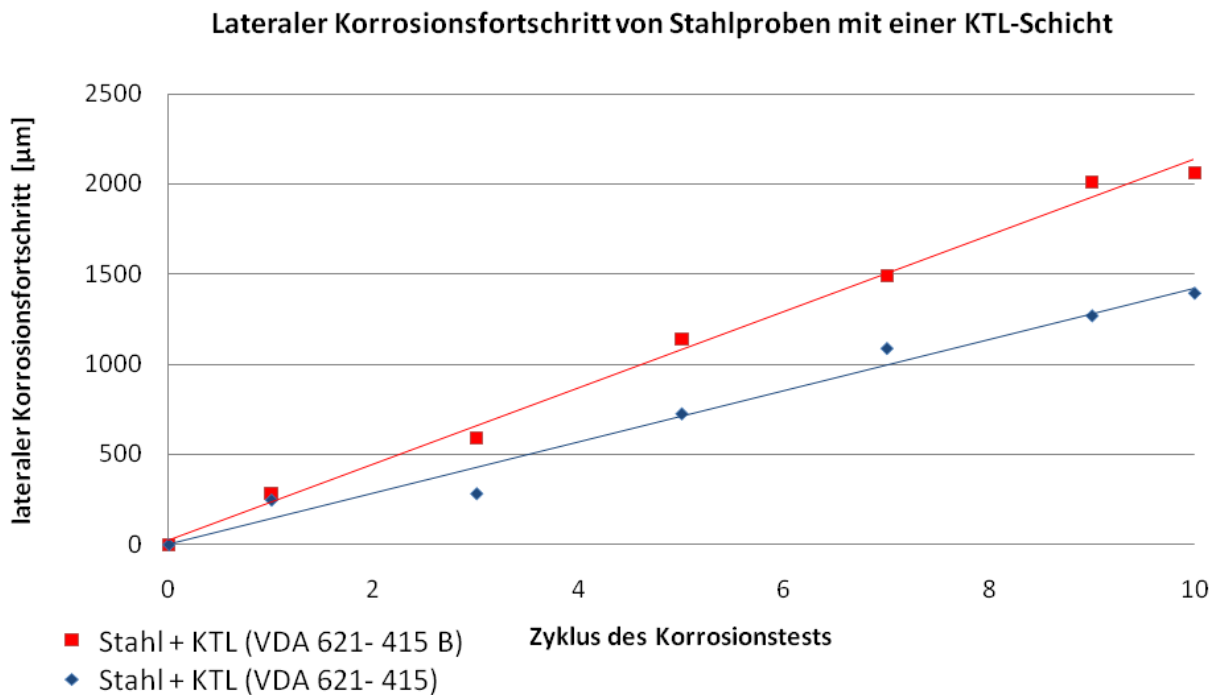
**Abb. 98 Linientopographie durch den Mittelpunkt eines Defektes nach korrosiver Auslagerung**

Eine Berechnung des abgetragenen Volumens (Kugelkalotte) konnte zeigen, dass in dem Test VDA 621-415 hauptsächlich ein lateraler Materialabtrag bis zum zehnten Zyklus stattgefunden hat. Hierbei konnte ein durchschnittlicher lateraler Korrosionsangriff ausgehend vom Steinschlagdefektrand von  $1400 \pm 100 \text{ µm}$  nach zehn Zyklen festgestellt werden. In vertikaler Richtung konnte kein messbarer Materialabtrag ermittelt werden. Ergebnisse aus dem VDA621-415B zeigen einen stärkeren lateralen Korrosionsfortschritt im Abstand von  $2100 \text{ µm} \pm 300 \text{ µm}$  zum Defektrand (Referenz: Radius des Steinschlagdefektes  $500 \text{ µm}$ ). In vertikaler Richtung konnte ein Materialabtrag bis zu einer maximalen Tiefe von  $100 \text{ µm}$  gemessen werden. Der Materialabtrag durch Korrosion wurde vergleichend für die Ergebnisse aus beiden Korrosionswechseltests bestimmt (Abb. 99). Hierbei weisen Steinschlagdefekte, getestet in VDA 621-415 (zehn Zyklen), einen durchschnittlichen Materialabtrag von auf. Im Vergleich dazu fällt  $0,0013^{+0,00018}_{-0,00002} \text{ g}$  der Korrosionsfortschritt an Steinschlagdefekten aus dem VDA 621-415 B (zehn Zyklen) stärker aus. Im Mittel weisen die Proben einen Materialabtrag von  $0,0028^{+0,00254}_{-0,00132} \text{ g}$  auf, der jedoch starke Abweichungen zeigt.



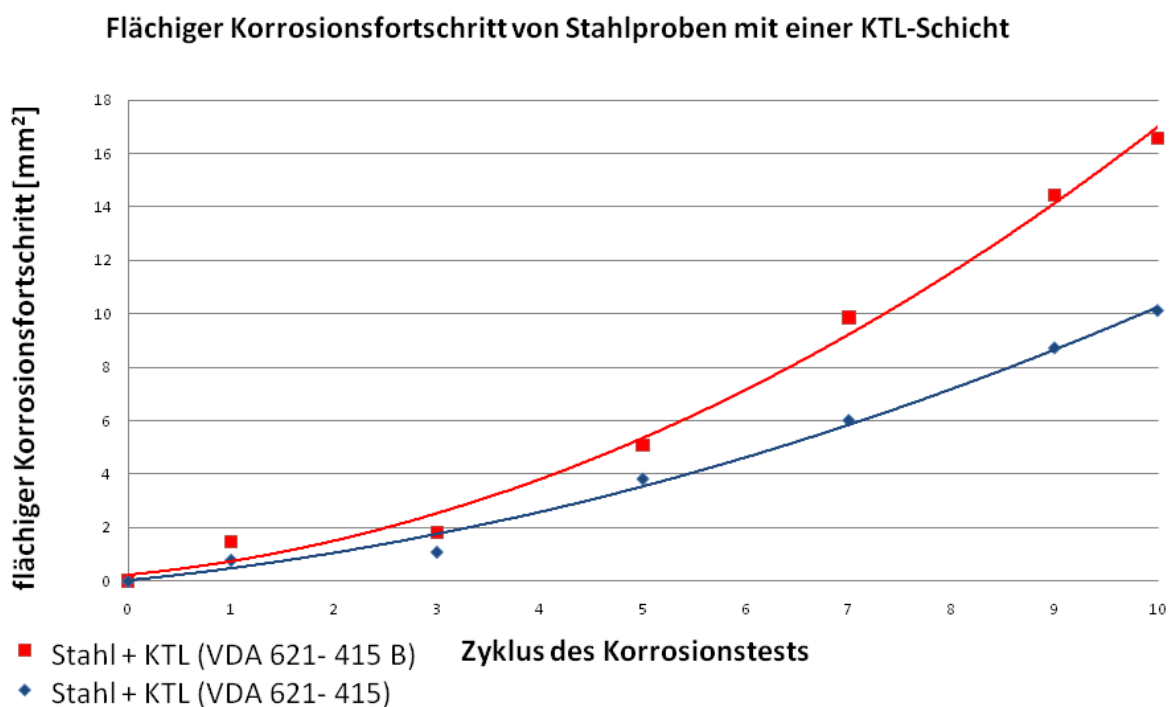
**Abb. 99 Vergleich des Materialabtrages eines Steinschlagdefektes in verschiedenen Korrosionswechseltest nach zehn Zyklen**

Der Korrosionsfortschritt konnte mit Hilfe der Puls-Phasen-Thermographie auch zwischen den Zyklen des Testes untersucht werden. Hierbei wurden die Proben vor dem Test, nach den Zyklen 1, 3, 5, 7, 9 sowie am Ende der Korrosionswechseltests untersucht.



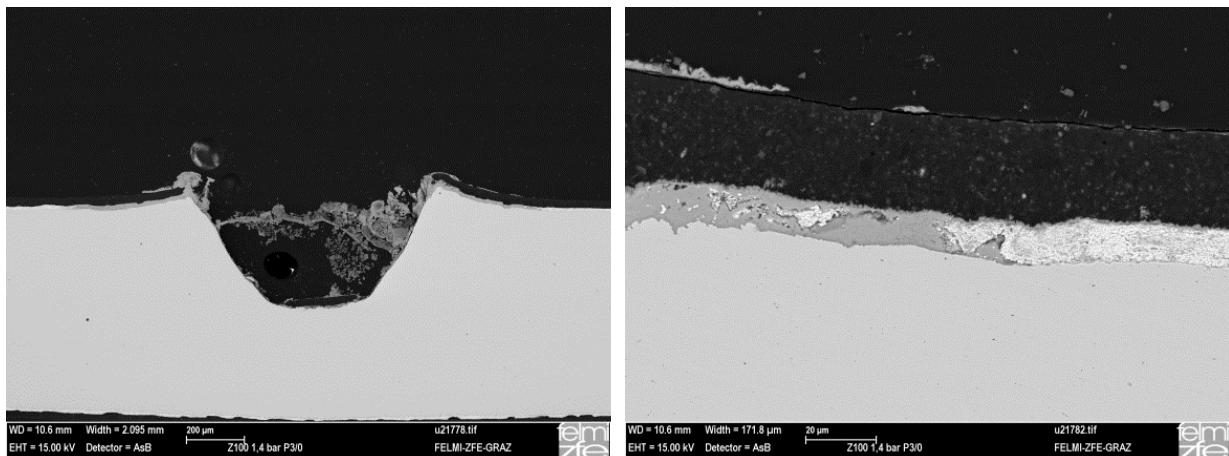
**Abb. 100 Lateraler Korrosionsfortschritt ausgehend vom Defektrand an KTL-beschichtetem Stahl in den Korrosionswechseltests VDA621-415 VDA621-415B**

Auswertungen der PPT zeigen einen lateralen Korrosionsfortschritt der Proben, der linear über die zehn Zyklen zunimmt. Der Korrosionswechseltest (VDA 621-415B) zeigt hierbei einen stärkeren Korrosionsfortschritt in lateraler Ausbreitung, als der Test nach VDA 621-415 (Abb. 100). Eine Analyse der flächigen Korrosion hat gezeigt, dass diese progressiv fortschreitet. Durch eine radiale Ausbreitung der Korrosion um den Defekt wird eine größere Angriffsfläche erzeugt, so dass sich die Korrosion weiter ausbreitet. Darum kann der flächige Korrosionsfortschritt mit einer Polynomfunktion beschrieben werden (Abb. 101).



**Abb. 101** Flächiger Korrosionsfortschritt an KTL-beschichtetem Stahl in den Korrosionswechseltests VDA621-415 und VDA621-415B

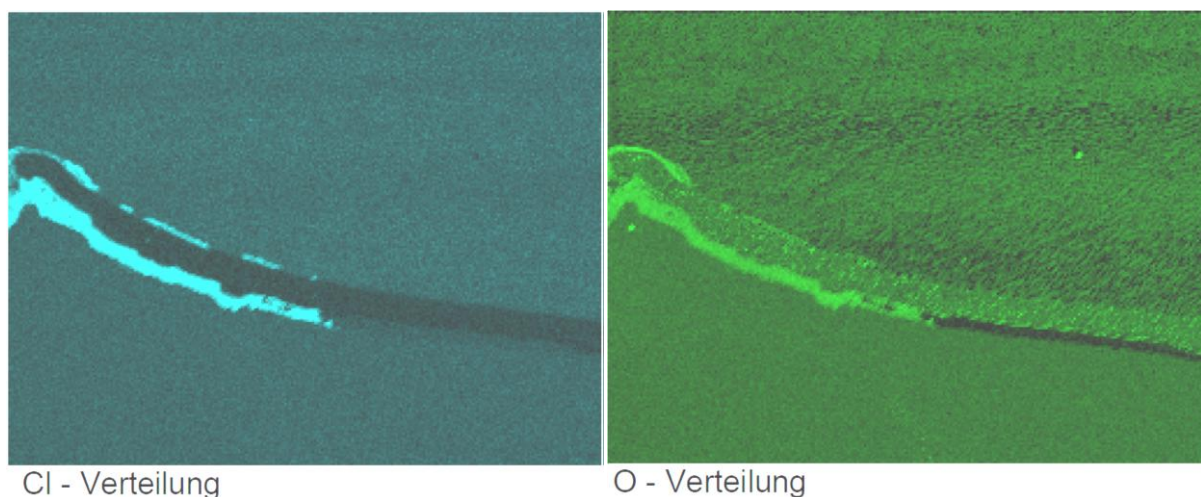
## 4.4.2 Verzinkter Stahl mit KTL-Beschichtung



**Abb. 102** Korrosionsfortschritt der Zinkschicht nach vier Zyklen VDA621-415

Verzinkte Substrate mit einer KTL-Beschichtung zeigen bei Defekten bis zum Substrat eine anodische Auflösung des Zinks. Der Korrosionsfortschritt äußert sich hierbei nicht durch den Materialabtrag des Stahls, sondern durch die Korrosion der Zinkschicht in lateraler Richtung. Hierbei weisen Proben nach vier Zyklen Korrosionswechselfest (VDA 621-415) keinen Materialabtrag des Grundwerkstoffes, sondern nur eine Korrosion der Zinkschicht auf (Abb. 102).

Eine energiedispersive Röntgenspektroskopie hat einen hohen Anteil an Chloriden in den Zinkkorrosionsprodukten nachgewiesen (Abb. 103).

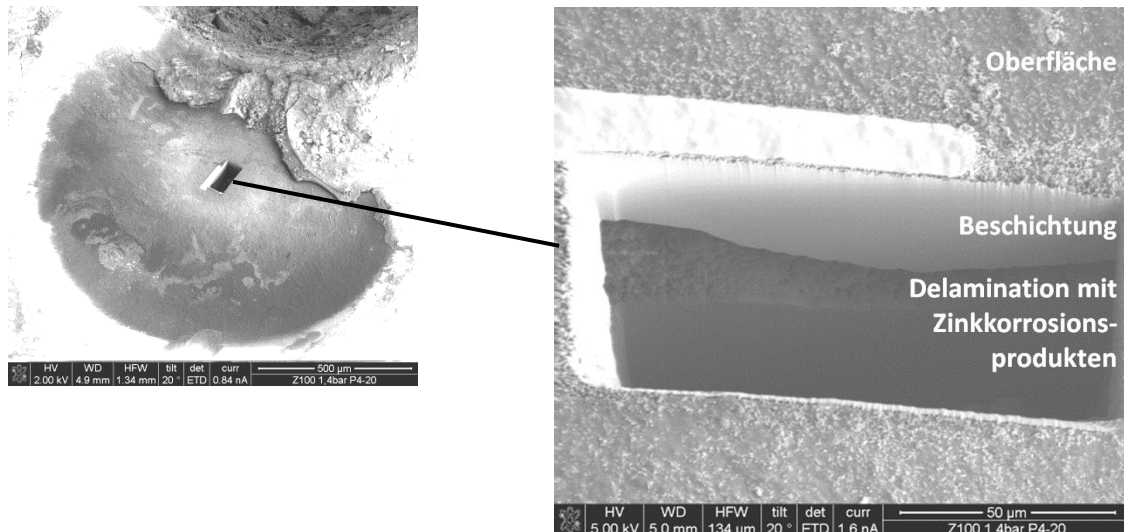


**Abb. 103** Cl- und O-Verteilung an einer verzinkten Probe nach vier Zyklen VDA621-415

Durch einen hohen Chloridgehalt und ein dauerfeuchtes Klima unter der Beschichtung kann die Korrosion zu Blasenbildung führen (Abb. 104). Dieser Effekt tritt direkt neben dem Steinschlagdefekt auf und ist charakterisiert durch eine bereits korro-

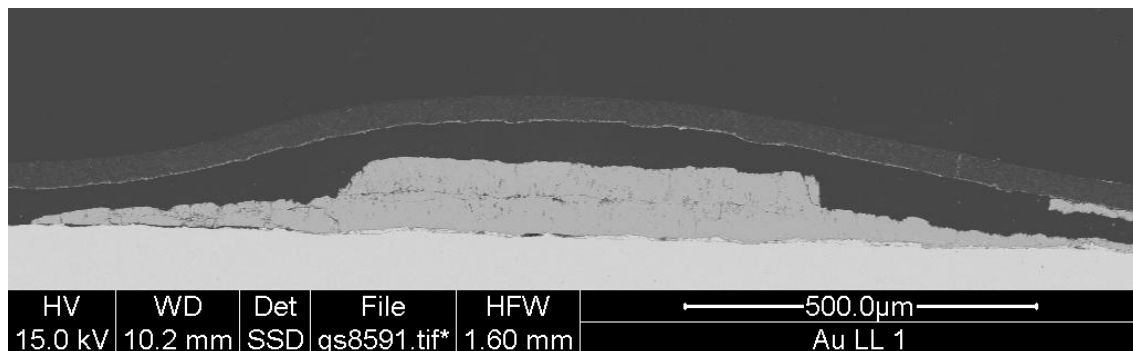


dierte Zinkschicht zwischen Blase und Steinschlagdefekt. Mit Hilfe eines FIB-Schnittes durch eine Blase konnte ermittelt werden, dass sich die KTL-Beschichtung von den Korrosionsprodukten vollständig gelöst hat (Abb. 105). Die bereits korrodierte Zinkschicht weist in diesem Bereich einen hohen Gehalt an Chloriden auf.



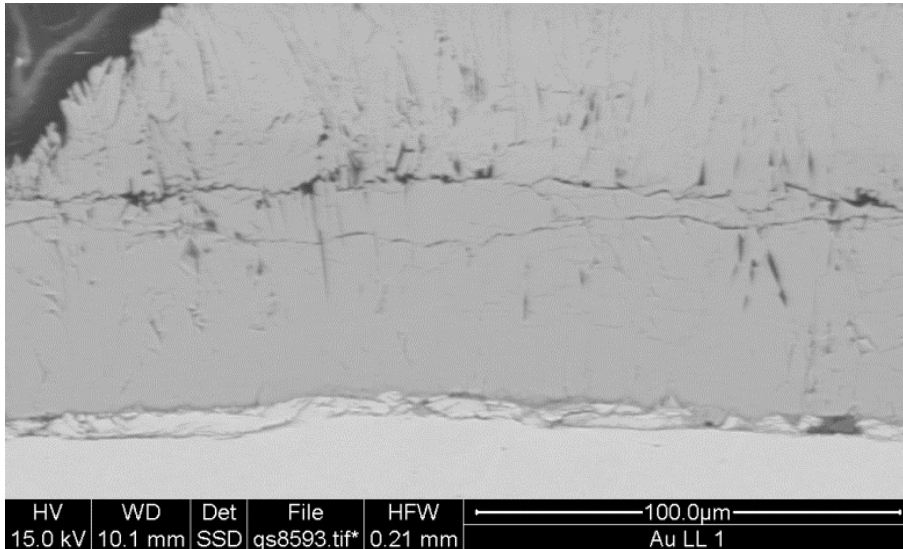
**Abb. 104 FIB-Schnitt einer Blase, um den Querschnitt und die Korrosionssituation unter einer Blase zu analysieren**

Untersuchungen von Blasen an feuerverzinkten Bauteilen aus Fahrzeugen haben ergeben, dass die Zinkschicht in einer Blase vollständig korrodiert und die Beschichtung angehoben wird. Dies ist wohl auf das dauerfeuchte Klima unter Blasen zurückzuführen, wobei eine Sauerstoffverarmung eintritt und die Korrosion unter Wasserstoffentwicklung abläuft. Hierbei wird der Druck, durch Bildung von Wasserstoff, auf die Beschichtung so hoch, dass diese abgehoben wird (Abb. 105) [57].



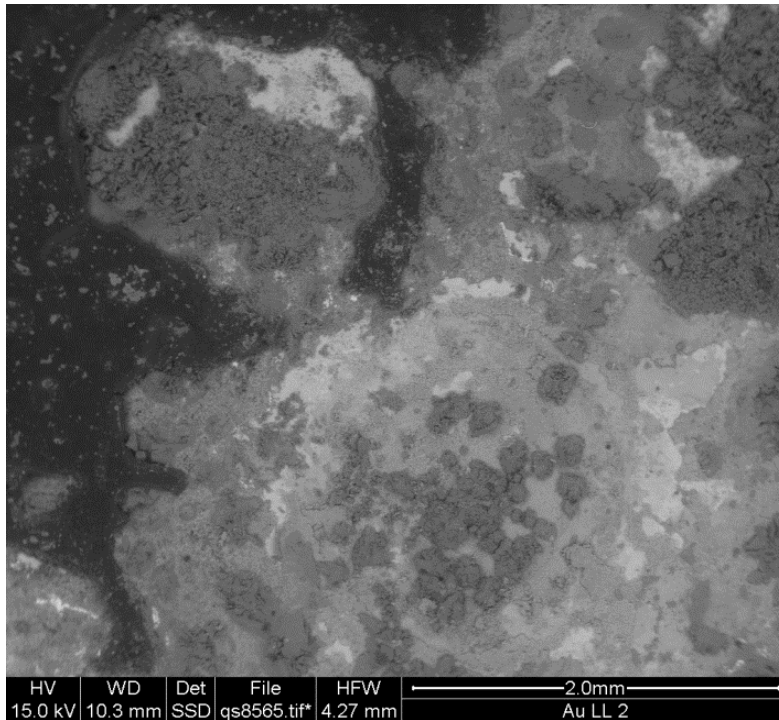
**Abb. 105 Blase einer verzinkten Stahlkomponente mit KTL-Beschichtung eines Feldfahrzeuges**

Untersuchungen der Grenzfläche zwischen den Zinkkorrosionsprodukten und dem Substrat haben eine Trennung der beiden Schichten durch eine nicht korrodierte aluminiumreiche Schicht gezeigt (Abb. 106). Durch die intakte aluminiumreiche Schicht wird das Substrat weiterhin vor Korrosion geschützt.



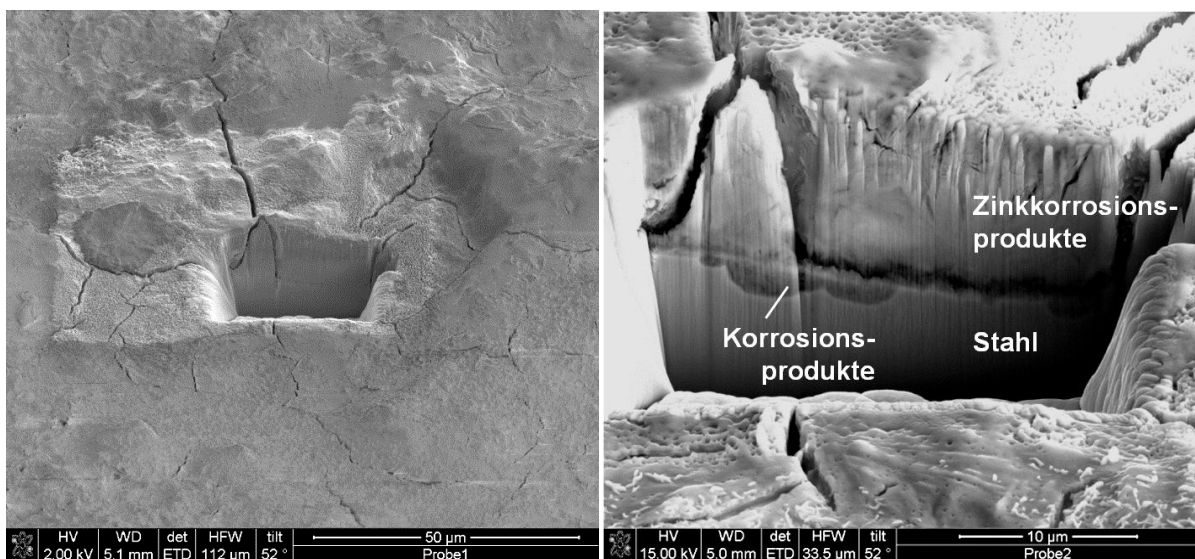
**Abb. 106 Aluminiumreiche Zwischenschicht zwischen Zinkkorrosionsprodukten und dem Stahlsubstrat**

Nach einer Ablösung der KTL-Schicht einer Blase konnte der korrodierte Bereich mit Hilfe eines ESEM genauer untersucht werden (Abb. 107). Es wurde ermittelt, dass sich Zinkkorrosionsprodukte in der Mitte einer Blase anreichern und an den Blasenrändern die Zinkschichtdicke abnimmt. Hier können hohe Aluminiumkonzentrationen gemessen werden, was auf die Zwischenschicht über dem Substrat schließen lässt. Teilweise konnte die korrodierte Zinkschicht an den entfernten KTL-Beschichtungsstellen lokalisiert werden, vor allem an Randbereichen von Blasen, wo eine noch bestehende Adhäsion zwischen Schicht und Korrosionsprodukten besteht. Dies erklärt auch die aluminiumreichen Stellen an Randbereichen von Blasen nach einer Oberflächenanalyse.



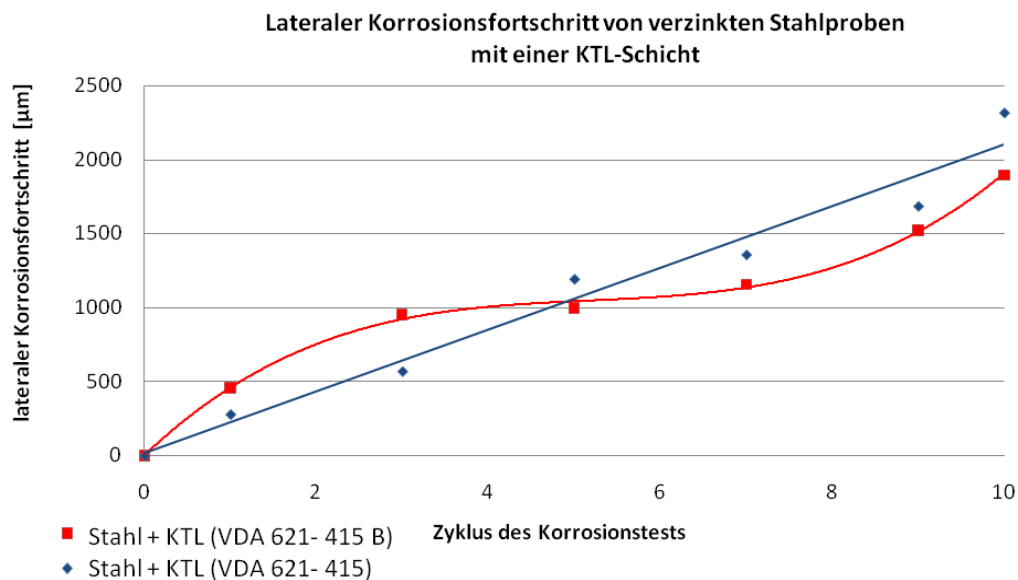
**Abb. 107** Oberfläche des Materials unter einer Blase nach Entfernung der KTL-Schicht

Die Korrosionsschicht aus Zink schützt weiterhin das Substrat, jedoch können diese spröden Schichten rissig werden. An Bereichen an denen Zinkschichten aufbrechen, können Eisenkorrosionsprodukte an der Oberfläche detektiert werden. Eine genaue Analyse dieser Bereiche hat gezeigt, dass Risse bis zum Substrat reichen können. Dadurch kann der Elektrolyt bis zum Stahlsubstrat vordringen und Korrosion induzieren. An diesen Stellen konnte ein Materialabtrag von 1-2  $\mu\text{m}$  mit Hilfe eines FIB-Schnittes gemessen werden.



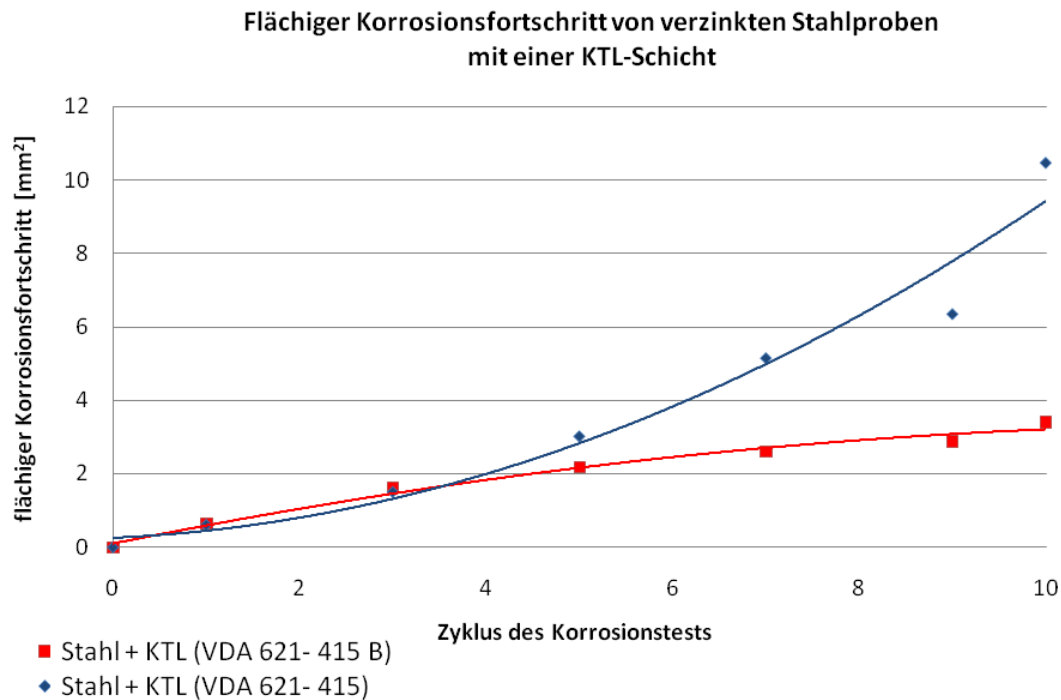
**Abb. 108** FIB-Schnitt an einer Blase mit rissiger Zinkkorrosionsschicht

Mit Hilfe der PPT konnten der Korrosionsfortschritt und das Blasenwachstum analysiert werden. Feuerverzinkte Stahlproben (Z100) mit einer KTL-Beschichtung zeigten in den beiden Korrosionswechselltests einen unterschiedlichen Korrosionsfortschritt. Proben im KWT nach VDA 621-415 wiesen ein lineares Blasenwachstum auf. Jedoch haben Proben in dem KWT nach VDA 621-415B ein beschleunigtes und ein gebremstes Blasenwachstum gezeigt. Bis zum dritten Zyklus war das laterale Blasenwachstum stärker als bei dem VDA 621-415 ausgeprägt, anschließend kam jedoch das Blasenwachstum bis zum siebten Zyklus zum Stehen. Erst danach konnte wieder ein erhöhtes Blasenwachstum festgestellt werden, das mit einer Polynomfunktion dritten Grades beschrieben werden (Abb. 109).



**Abb. 109 Lateraler Korrosionsfortschritt ausgehend vom Defektrand an verzinktem Stahl mit einer KTL-Schicht in den Korrosionswechselltests VDA621-415 VDA621-415B**

Es zeigt sich, dass das Blasenwachstum in den beiden unterschiedlichen Korrosionstests in lateraler Richtung ähnlich schnell fortschreiten kann. Die maximale laterale Ausbreitung einzelner Blasen fällt ähnliche aus. Jedoch konnte nach einer Analyse des flächigen Korrosionsfortschrittes ein Unterschied der Ergebnisse aus beiden Korrosionswechselltests ermittelt werden (Abb. 110). Der Test nach VDA 621-415B weist an den Proben einen geringeren Angriff der Gesamtfläche um den Stein-schlagdefekt auf. Ein leicht degressiver Verlauf im Gegensatz zu dem progressiven Verlauf des Korrosionsfortschrittes im VDA 621-415 konnte ermittelt werden.

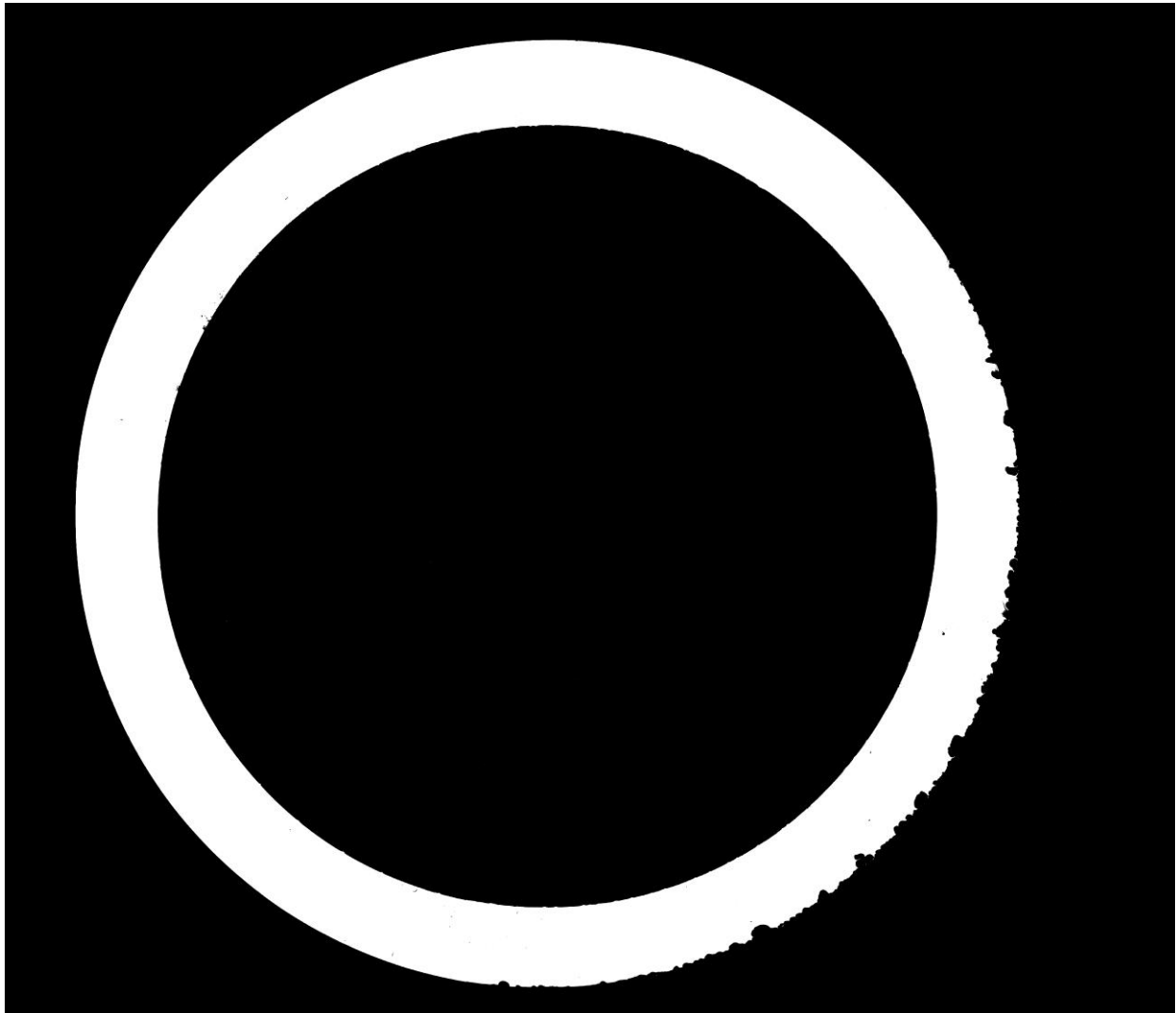


**Abb. 110 Flächiger Korrosionsfortschritt ausgehend an KTL-beschichtetem, verzinktem Stahl in den Korrosionswechseltests VDA621-415 VDA621-415B**

Der degressive Verlauf des Korrosionsfortschritts an verzinkten Stahlproben im VDA621-415B kann durch die Repassivierungsphasen der Zinkschicht begründet werden. Hierbei kann sich eine schützende Zinkoxidschicht ausbilden, die vor weiterem Korrosionsangriff schützt. Im Vergleich ist durch das dauerfeuchte Klima im Korrosionstest VDA621-415 kein Aufbau einer Schutzschicht möglich. Hierbei ist ein progressiver Verlauf des Korrosionsfortschrittes zu erkennen. Dieser liegt darin begründet, dass durch einen kreisförmigen Korrosionsfortschritt um den Defekt, eine immer größer werdende Angriffsfläche für Korrosion bereitgestellt wird. Die Korrosion wird hierbei nicht beschleunigt, sondern läuft weiterhin konstant ab, jedoch an einer größeren Korrosionsfront und erzeugt somit einen progressiven Verlauf des flächigen Korrosionsfortschritts.

- 4.5 Korrosionsfortschritt an Komponenten von Fahrzeugen aus unterschiedlichen Regionen
- 4.5.1 Materialabtragsdaten von Fahrwerkskomponenten

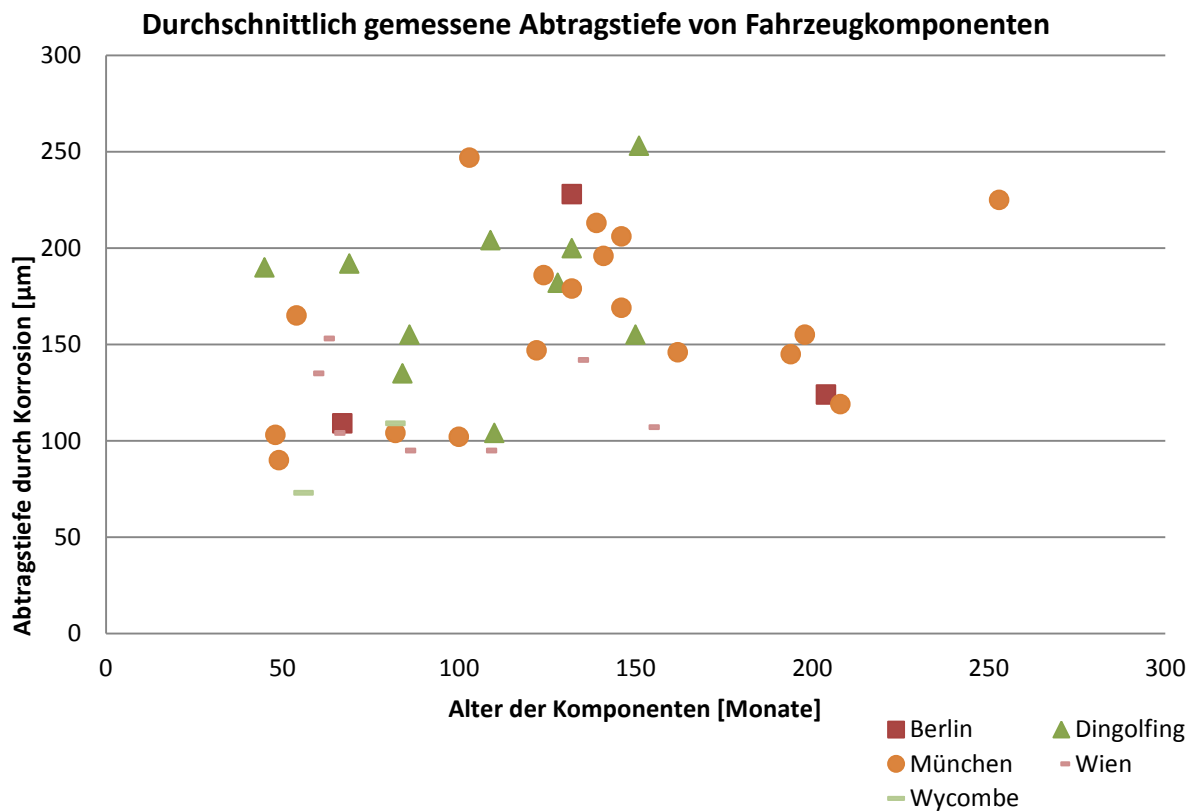
Um ein Prognosemodell des korrosiven Abtrages von steinschlagbelasteten Fahrwerkskomponenten zu erstellen, wurden ausgewählte, stark korrosiv belastete Abtriebswellen der Hinterachse von Kundenfahrzeugen in unterschiedlichen Regionen ausgetauscht und untersucht. Abb. 111 zeigt ein Schliffbild einer Abtriebswelle an einem Steinschlagdefekt.



**Abb. 111** Lichtmikroskopische Aufnahme eines Schliffbildes der Abtriebswelle

Es wurde eine durchschnittliche Abtragtiefe der Komponenten ermittelt, indem die Defektstelle an zehn verschiedenen Punkten auf ihre Korrosionstiefe untersucht wurde. Abbildung 112 zeigt alle Ergebnisse der metallografischen Auswertung der

durchschnittlichen Materialabtragstiefen von Komponenten aus unterschiedlichen Ländern.



**Abb. 112 Durchschnittliche Materialabtragswerte an Steinschlagdefekten von Abtriebswellen aus unterschiedlichen Regionen**

Es konnte hierbei ermittelt werden, dass die Materialabtragsraten an dynamisch belasteten Komponenten in den Orten Berlin (D), Dingolfing (D), München (D), Wien (AUT), Wycombe (GBR) einen ähnlich starken Fortschritt aufweisen. Diese an der Fläche gemessenen Abtragswerte weisen jedoch in Dingolfing und München einen leicht erhöhten Materialabtrag auf. Jedoch kann aus der Abbildung 112 große Abweichung (bis zu 100%) der Abtragsraten selbst innerhalb einer Region ermittelt werden. Diese Abweichungen können auf eine unterschiedliche Nutzung, Pflege, Abstellort und weitere Einflüsse des Fahrzeugs zurückzuführen sein. Tendenziell nimmt die Abtragtiefe mit dem Alter der Fahrzeuge zu. Es ist aber auch zu erkennen, dass der Materialabtrag durch einen degressiven Verlauf gekennzeichnet ist. Dieser degressive Verlauf ist dadurch gekennzeichnet, dass die Materialabtragsrate abnimmt. Dieser Effekt kann auf eine Schutzschichtbildung durch Passivschichten zurückzuführen sein. Eine grundlegende Aussage, dass alle Komponenten im Unter-

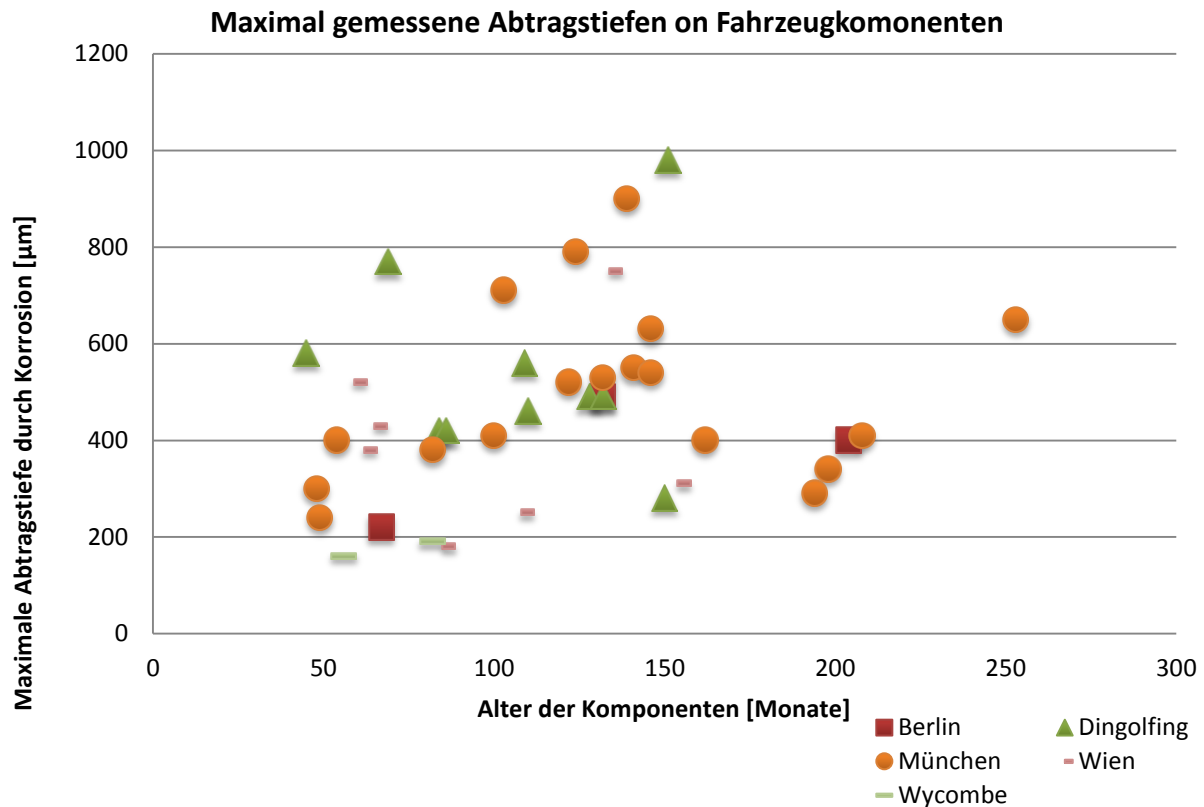
flurbereich einen degressiven Korrosionsverlauf aufweisen, kann jedoch nicht getroffen werden. Bei den untersuchten Komponenten handelt es sich um rücktrocknenfähige Bereiche, die eine Ansammlung von Wasser verhindern und kein dauerfeuchtes Klima erzeugt werden kann. Durch eine zusätzliche Steinschlagbelastung dieser Komponenten kann jedoch die Inkubationszeit, bis Korrosion einsetzt, verringert werden. Hierbei kann die Beschichtung bereits in einem frühen Stadium durch mechanische Verletzungen beschädigt werden und Korrosion starten.

An dem Verlauf in Abbildung 112 ist auch noch zu erkennen, dass bei Fahrzeugen mit einem Alter größer als 180 Monaten ein geringer Materialabtrag festgestellt wurde. Dieser ist wohl auf bleihaltige und Chrom-VI haltige Beschichtungen, die einen besseren Korrosionsschutz bieten, zurückzuführen. Heutzutage sind diese Bestandteile in Beschichtungssystemen verboten und kommen darum nicht mehr zum Einsatz.

Zusätzlich wurde an den Komponenten die maximale Abtragstiefe durch Korrosion bestimmt (Abb. 113). Hierbei ist der Unterschied zur oben gezeigten Abbildung 112, dass nicht ein Durchschnittswert von 10 Messungen genutzt wird, sondern die maximale Abtragstiefe durch Korrosion angezeigt wird. Dadurch kann der lokal erhöhte korrosive Abtrag von Komponenten ermittelt werden. Problematisch ist der genau Zeitpunkt der Defekteinbringung durch Steinschlag. Es kann hierbei nicht genau bestimmt werden, wann die Beschichtung beschädigt wurde und die Korrosion begonnen hat. Diese verursachten Abweichungen können in den vorgestellten Abbildungen nicht dargestellt werden.

Der Materialabtrag wird durch Vernachlässigung der Defekteinbringung mit dem Fahrzeugalter korreliert. Dadurch werden Abweichungen bei der Beurteilung des Materialabtrags generiert. Bei der Auswertung werden darum nur die maximalen Abtragsraten in einem Prognosemodell wiedergegeben, da die minimalen Abtragsraten vernachlässigbar sind, falls die Beschichtung bis zum Zeitpunkt der Messung nicht beschädigt worden sind. Es wurden hierbei auch nur Defekte an Oberflächen untersucht, die keine Ansammlung von Feuchtigkeit ermöglichen und gut Trocknen können, um zusätzliche Einflussgrößen vernachlässigen zu können.





**Abb. 113 Maximale Materialabtragswerte (Lochfraß) an Steinschlagdefekten von Abtriebswellen aus unterschiedlichen Regionen**

Die Analysen des maximalen korrosiven Abtrages von Einzelmessungen zeigen eine erhöhte korrosive Belastung in den Regionen München und Dingolfing (entspricht den Tendenzen der durchschnittlichen Abtragstiefen). Maximale Abtragstiefen werden durch Lochfraß und Muldenkorrosion erreicht. Hierbei wird die Passivschicht an einzelnen Stellen durch Chloride zerstört und ein lokal erhöhter Materialabtrag kann ermittelt werden. Dieser ungleichmäßige korrosive Materialabtrag kann in einer lichtbildmikroskopischen Aufnahme (Abb. 111) erkannt werden.

In Wien und Berlin wurden im Vergleich geringere Materialabtragstiefen gemessen. Die am geringsten durch Materialabtrag analysierten Proben waren aus Wycombe. Durch die geringe Steinschlagbelastung in Wycombe war es nicht möglich, eine größere statistische Verteilung des Korrosionsfortschrittes an Komponenten zu untersuchen, da eine große Anzahl an Komponenten keine Defekte aufgewiesen hat.

#### 4.5.2 Umweltdaten der unterschiedlichen Regionen

Um die ermittelten Daten des Materialabtrages mit Umwelteinflussgrößen zu korrelieren, wurden Daten von Umweltbehörden, Wetterdiensten und den regionalen Winterdiensten eingeholt. Hierbei wirken unterschiedliche Einflussgrößen auf die Korrosion ein, die für die Geschwindigkeit des Korrosionsfortschritts verantwortlich sind. Als Haupteinflussfaktoren für den Korrosionsfortschritt an Unterflurkomponenten werden folgende Einflussgrößen berücksichtigt:

##### **Relative Luftfeuchtigkeit**

Die relative Luftfeuchtigkeit liegt unabhängig vom Fahrzustand des Fahrzeuges an den Komponenten an, und es kann sich ein Elektrolyt auf der Materialoberfläche bilden, der zu Korrosion führen kann. Hierbei wird als Grenzwert der Luftfeuchtigkeit ein Wert von 90 % für Stahl berücksichtigt.

##### **Niederschlag**

Der Niederschlag beeinflusst Komponenten am Unterflur von Fahrzeugen nur indirekt. Durch die Bewegung des Fahrzeugs werden Komponenten durch Spritzwasser von der Straße befeuchtet. Zusätzlich wurden Daten des pH-Wertes des Niederschlages eingeholt, um die Aggressivität des Elektrolyten zu bestimmen.

##### **Chloride**

Die Chloridbelastung wird in zweierlei Hinsicht berücksichtigt. Einerseits wird der Chloridgehalt im Regenwasser bewertet, der über das ganze Jahr durch den Niederschlag auf die Straße gelangt und Komponenten belastet. Andererseits wird eine stark erhöhte Chloridbelastung in den Wintermonaten einbezogen, die die Korrosion stark beschleunigen kann. Um die Zahl der Streutage und den damit verbundenen Chloridanteil zu bestimmen, wurde davon ausgegangen, dass an Tagen mit mehr als 1 cm Schnee gestreut wird.

##### **SO<sub>2</sub>**

Werte der SO<sub>2</sub>-Belastung wurde in den unterschiedlichen Regionen eingeholt, da diese die Korrosionsgeschwindigkeit beeinflusst. In den untersuchten Regionen hat die Belastung durch SO<sub>2</sub> über die Jahre abgenommen und wirkt sich darum nicht mehr so stark auf die Korrosionsgeschwindigkeit aus. Darum wurde eine durchschnittliche SO<sub>2</sub>-Belastung gemittelt über die Jahre angenommen.

### PM10-Konzentration

Die Feinstaubbelastung trägt zum korrosiven Fortschritt an Komponenten bei, indem der Feinstaub sich auf Komponenten ablagern und Feuchtigkeit auf der Oberfläche halten kann. Zusätzlich können sich Elemente wie Kohlenstoff ablagern, die Kontaktkorrosion hervorrufen können.

In Tabelle 4 können die von den Instituten gemessenen Werte eingesehen werden.

Region	f90 (Anteil über 90% Luftfeuchte)	Niederschlag [m/Jahr]	pH-Wert Niederschlag	Anzahl Schneetage	SO <sub>2</sub> [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	CL <sup>-</sup> [mg/(l)]	Feinstaub PM <sub>10</sub> [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]
München	0,225 [b]	0,9744 [b]	5,3 [a]	33,3 [b]	6,1 [a]	0,21 [a]	36,18 [a]
Berlin	0,165 [b]	0,5817 [b]	4,7 [a]	43 [i]	4 [i]	0,71 [a]	37,86 [a]
Dingolfing	0,328 [b]	0,5949 [b]	4,9 [a]	18,1 [b]	3,86 [x]	0,25 [a]	27,76 [a]
Wien	0,223 [b]	0,5479 [d]	5,7 [c]	39,1 [d]	-	-	38 [h]
London	0,173 [f]	0,5836 [e]	4,9 [g]	7,5 [e]	7,1 [f]	-	35 [f]

**Tabelle 4 Umwelteinflussgrößen aus den Untersuchungsregionen**

[a] Umweltbundesamt Deutschland

[b] Deutscher Wetterdienst

[c] Bundesversuchsanstalt Wien

[d] ZAMG

[e] UK Nationaler Wetterdienst

[f] Environmental Research Group (ERG) at King's College London

[g] Study of Acid Rain in Hong Kong (Paper)

[h] Umweltbundesamt Österreich

[i] Berliner Stadtreinigungsbetriebe

### 4.5.3 Korrelation des Materialabtrages mit den Umwelteinflussgrößen

Um den Materialabtrag von Komponenten mit umweltspezifischen Einflussgrößen zu korrelieren, wurde das Materialabtragsprognosemodell (statisch ausgelagerte Probe) von Lipfert [96, 97] als Basis genutzt. Das Modell von Lipfert eignet sich als Basis für ein dynamisches Modell für Fahrwerkskomponenten, da die Hauptbelastungsgrößen eines Fahrzeuges in der Prognoseformel berücksichtigt werden. Darum wurde dieses Modell genutzt und durch die dynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen und die dadurch verursachte Änderung von Einflussgrößen erweitert. In dem folgenden Modell wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug täglich bewegt wird. Eine zusätzliche Belastung durch Streusalz wird durch einen Summanden in der Formel berücksichtigt, der mit einem Faktor der Anzahl der Schneetage im Jahr multipliziert wird. Die Reinigung von Komponenten durch Regenwasser wird nicht berücksichtigt, da Unterflurkomponenten nur durch Spritzwasser beaufschlagt werden und sich Verunreinigungen von der Straße ablagern können. Durch die dynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen ist es nicht möglich, eine Ablagerungsrate von umweltspezifischen Einflussgrößen zu bestimmen, darum werden Konzentrationen von Einflussfaktoren ( $PM_{10}$ ,  $Cl_{\text{Regen}}^-$ ) in der Luft angegeben. Im Folgenden werden die maximal zu erwartenden Materialabtragsraten von Fahrwerkskomponenten aufgeführt.

$$\ln(K_{Fe}) = 5,74 + (0,570) \ln(f_{90}t) + (0,286) \ln(f_{90}SO_2) + (0,02329) \ln(H^+) + (0,148) \ln(Cl_{\text{Luft}}^-) + (0,16) \ln(\text{Schnee } Cl_{\text{Streut}}^-) + (0,051) \ln(PM_{10}) \quad (60)$$

Abkürzung	Beschriebener Parameter	Einheit
$K_{Fe}, K_{Zn}$	Massenverlust Stahl, Zink	$g/m^2$
$f_{90}$	Anteil der Zeit der relativen Luftfeuchtigkeit über 90 %	-
$SO_2$	$SO_2$ Luftkonzentration	$\mu g/m^3$
$H^+$	Wasserstoffionenkonzentration	$meq/(m^2y)$
$Cl_{\text{Luft}}^-$	Chloridkonzentration der Luft	$mg/(m^3)$
$Cl_{\text{Streut}}^-$	Chloridkonzentration auf der Straße	$mg/(m^2 \text{Streutag})$
$PM_{10}$	Staubablagerung	$mg/(m^3)$
<i>Schnee</i>	Anteil Tage mit Schnee >1cm	$d/y$

**Tabelle 5 Umwelteinflussgrößen mit Einheiten**

Ergebnisse mit der erstellten Formel ermöglichen eine Prognose des maximalen Abtrags durch Korrosion und stellen die obere Grenze des Materialabtrags innerhalb einer Region dar. Durch variierende Daten aus Feldbeobachtung ist es nur möglich eine maximale Abtragsrate zu begrenzen. Diese Begrenzung von Abtragsraten, ermöglicht eine sichere Auslegung der Wanddicken von Komponenten, um ein Versagen zu vermeiden.

Abbildungen 114a - e zeigen jedoch, dass die Korrosion an Komponenten mit höherem Alter im Vergleich zu Komponenten mit einem Alter bis zu 100 Monate nicht stärker ausgeprägt ist. In der Prognoseformel für den korrosiven Materialabtrag wird eine aktuelle KTL-Beschichtung berücksichtigt. Jedoch haben sich die Bestandteile von Beschichtungen durch Maßnahmen für den Umweltschutz geändert. Durch gesetzliche Änderungen und umweltfreundlichere Beschichtungen wurden Chrom-VI und Blei als Bestandteil von Beschichtungssystemen verboten. Diese stark korrosionshemmenden Zusätze erklären die geringen Materialabtragswerte von Komponenten vor der Umstellung auf diese Systeme. Die Unterboden-Wachs-Konservierung wurde mit dem Produktionsjahr 2002 aus Umweltgründen nicht mehr durchgeführt. Durch diese Einflussgrößen, die zusätzlich durch das Beschichtungssystem hervorgerufen werden, ist eine langfristige Prognose des Korrosionsfortschritts nicht möglich und die Prognoseformel korreliert nicht mit maximal gemessenen Materialabtragsraten. Ermittelte Materialabtragsraten zeigen hierbei nur einen geringen Anstieg mit dem Fahrzeugalter. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass durch Umstellungen von Beschichtungssystemen erhöhte Materialabtragsraten, im Vergleich zu alten Fahrwerkskomponenten zu erwarten sind. Darum zeigt die rechnerische Prognoseformel aktueller Komponenten einen erhöhten Grenzbereich des Materialabtrags von Komponenten. Die folgenden Diagramme zeigen gemessene Materialabtragsraten aus verschiedenen Regionen. Zusätzlich ist eine errechnete Kurve mit der oben genannten Materialabtragsformel eingezeichnet, die die Grenzabtragstiefen des durchschnittlichen korrosiven Abtrags von steinschlagbelastetem polymerbeschichtetem Stahl darstellen.

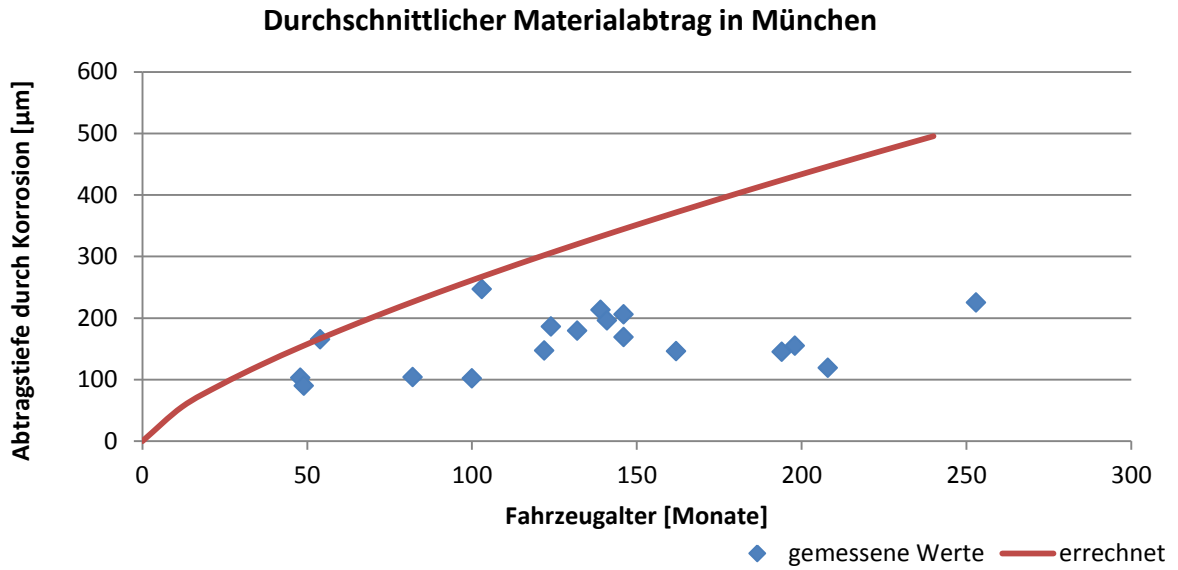


Abb. 114a Materialabtrag von Stahl mit einer KTL-Beschichtung gemessen in München

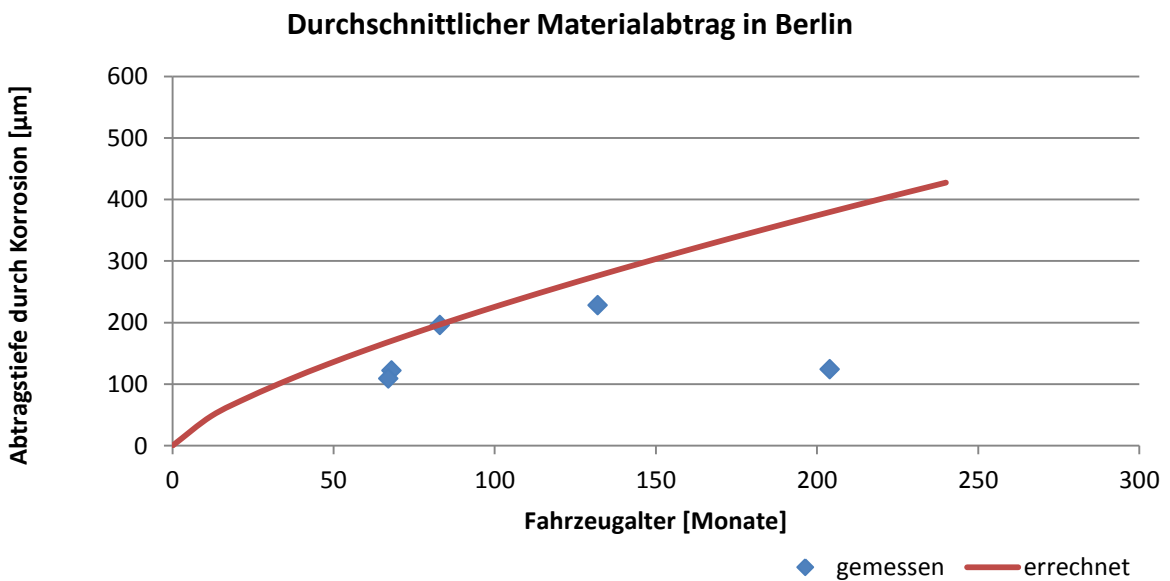


Abb. 114b Materialabtrag von Stahl mit einer KTL-Beschichtung gemessen in Berlin

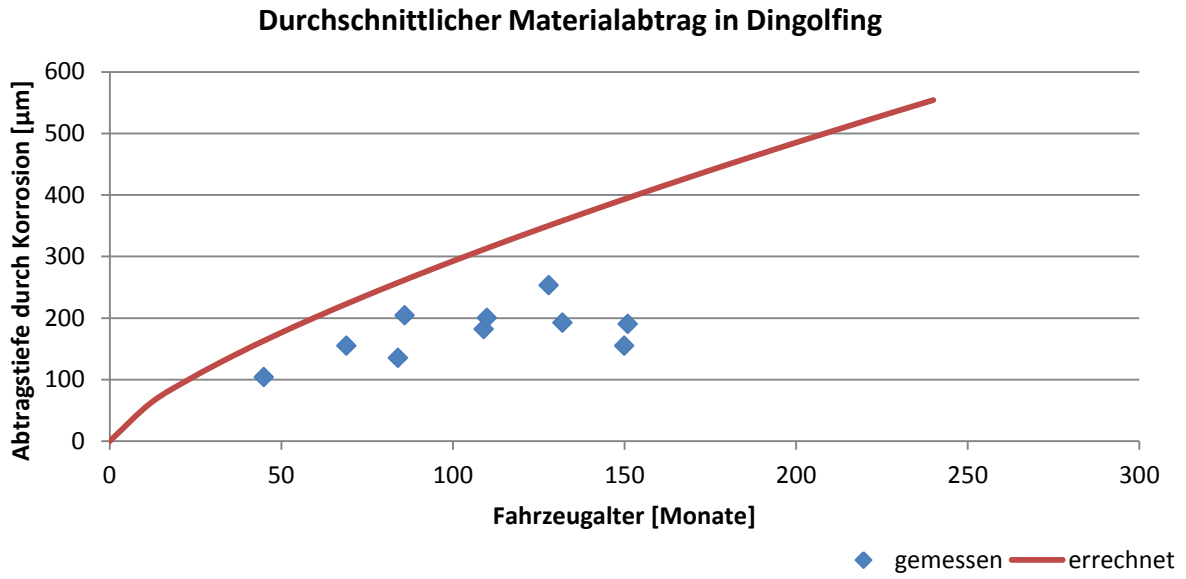


Abb. 114c Materialabtrag von Stahl mit einer KTL-Beschichtung gemessen in Dingolfing

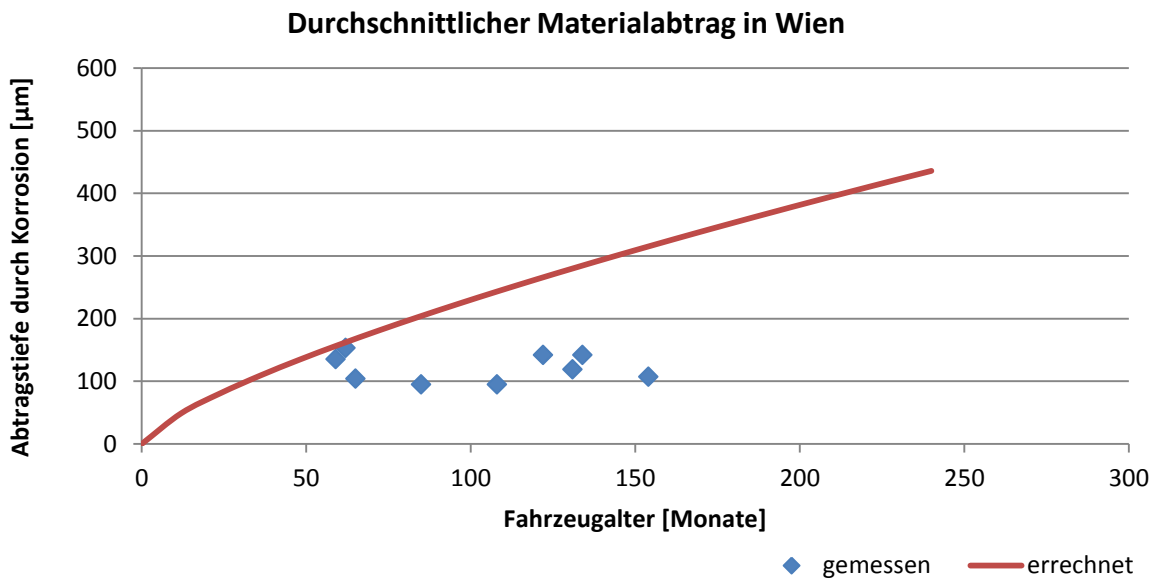


Abb. 114d Materialabtrag von Stahl mit einer KTL-Beschichtung gemessen in Wien

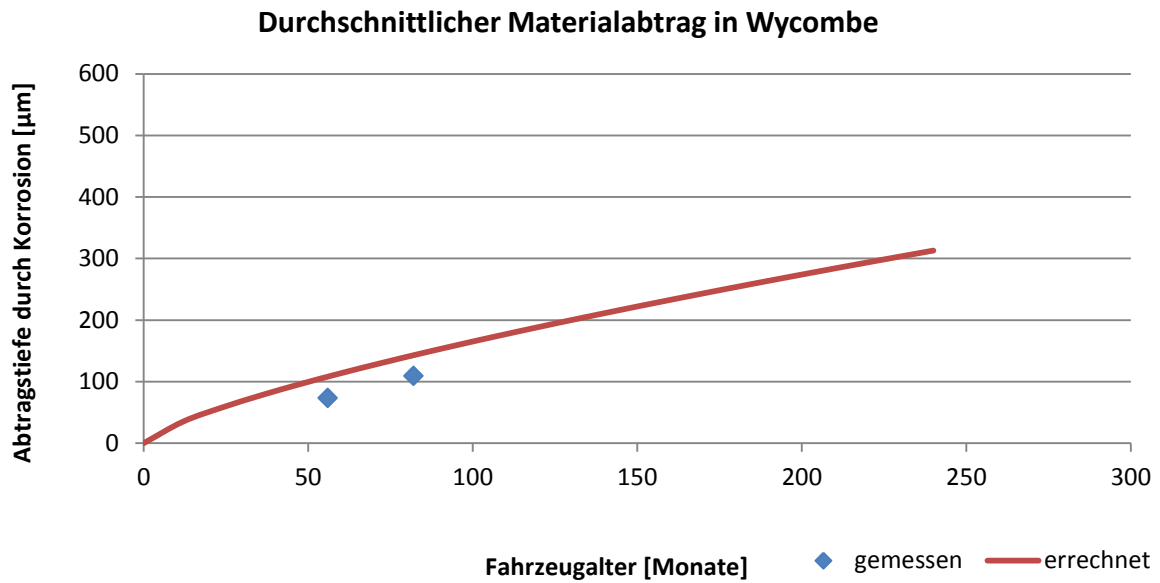


Abb. 114e Materialabtrag von Stahl mit einer KTL-Beschichtung gemessen in Wycombe

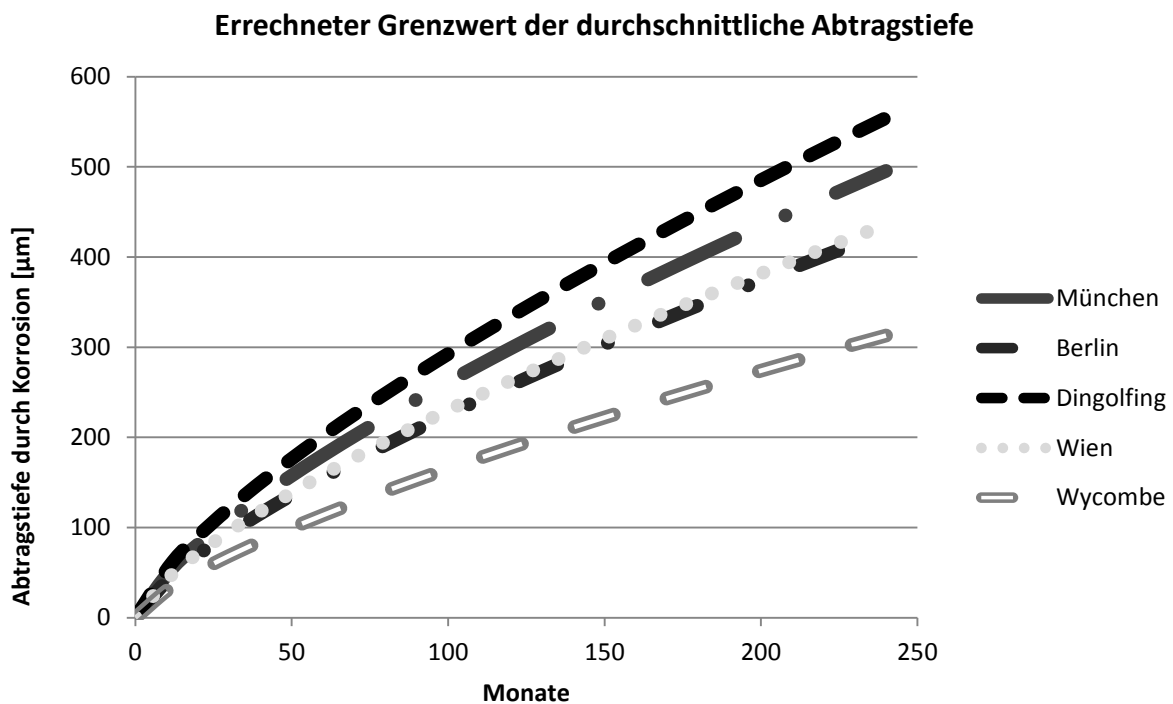


Abb. 114f Modell der Berechnung maximaler Durchschnittswerte des korrosiven Abtrags von Stahlkomponenten mit einer Polymerbeschichtung

Die ermittelte Formel zeigt nur eine Grenzprognose des maximal möglichen durchschnittlichen Abtrags, die durch die klimatischen Bedingungen erzeugt werden kann. Durch Eigenschaftsänderungen von Beschichtungssystemen und Änderungen der



klimatischen Bedingungen ist es nicht möglich einen exakten Wert der Materialabtragstiefe zu prognostizieren. Hierbei spielen viele Einflussgrößen eine entscheidende Rolle. Bis heute sind nicht alle Zusammenhänge zwischen Einflussgrößen und des korrosiven Materialabtrags verstanden. Hierbei können unterschiedliche Zusammensetzungen eines Elektrolyten, die durch den pH-Wert, Salzkonzentration und vieles mehr geprägt sind, einen großen Einfluss auf die Korrosion haben. Da sich die Bedingungen in der Umwelt und vor allem im Fahrbetrieb schnell ändern können, wird die Korrosion unterschiedlich stark beeinflusst. Hierbei hat selbst der Abstellort des Fahrzeuges eine entscheidende Rolle. Werden Fahrzeuge in kleinen Garagen abgestellt, kann sich die Feuchtigkeit länger halten und Korrosion länger wirken.

Darum kann die errechnete Formel nur als Grenzwertprognose für die untersuchten Komponenten genutzt werden. Selbst Komponenten am gleichen Fahrzeug können eine unterschiedlich starke Belastung durch Korrosion erfahren.

Im Fahrzeugbau haben Komponenten unterschiedliche geometrische Formen, die eine Wasseransammlung ermöglichen. Dadurch bleiben diese Komponenten länger Feucht. Eine Betrachtung von dauerfeuchten Bereichen, die weitaus höhere Materialabtragswerte aufweisen können, wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Vergleiche von Einzelmessungen von Abtriebswellen (Flächenkorrosion) und Hinterachsträgern (Spaltkorrosion) gleicher Fahrzeuge (vergleichbare Belastung) haben an dauerfeuchten Bereichen (Spalten) einen erhöhten Materialabtrag um mehr als 100% gezeigt. Auch vergleichende Untersuchungen an Schweißnähten (Hinterachsträger gleicher Fahrzeuge) haben weitaus höhere Materialabtragsraten gezeigt. Hierbei war vor allem die Wärmeeinflusszone betroffen, die erhöhte Materialabtragstiefen von mehr als +100% im Vergleich zur Flächenkorrosion gezeigt haben.

Darum zeigt sich, dass die Konstruktion von Komponenten einen wichtigen Einfluss auf den Korrosionsfortschritt hat. Komponenten im direkten Steinschlagbereich werden bereits mit verzinkten KTL-beschichteten Systemen geschützt. Hierbei konnte ein geringer Materialabtrag von maximal einem  $\mu\text{m}$  an Fahrzeugen mit einem Alter von 7 Jahren ermittelt werden.

Untersuchte Komponenten aus Stahl mit einer Pulverbeschichtung an steinschlaggefährdeten Bereichen, die eine gute Trocknung aufweisen, zeigen nur geringe Materialabtragswerte. Durch Leichtbau und geringer werdenden Grundmaterialdicken kann die steinschlaginduzierte Korrosion jedoch Auswirkung haben. Hierbei ist nicht nur die durchschnittliche Abtragsrate von Interesse, sondern auch die maxi-

male Abtragstiefe, die durch Korrosion erreicht werden kann. Dabei ist vor allem der Mechanismus des Lochfraßes zu berücksichtigen. Lochfraß entsteht wie in Kap. 2.6.2.1 beschrieben. Vor allem ein dauerfeuchtes Klima bewirkt hier die hohen Materialabtragswerte. Der Materialabtrag bei einer dauerfeuchten Belastung ( $f_{90}=1$ ), konnte ebenfalls mit der oben ermittelten Materialabtragsformel berechnet werden. Die berechneten Werte der maximalen lokalen Abtragstiefen stimmen mit den gemessenen Werten überein.

$$\ln(K_{Fe}) = 5,74 + (0,570) \ln(t) + (0,286) \ln(SO_2) + (0,02329) \ln(H^+) \quad (61)$$

$$+ (0,148) \ln(Cl_{Luft}^-) + (0,16) \ln(Schnee Cl_{Streu}^- t) + (0,051) \ln(PM_{10})$$

Maximale Abtragstiefen zeigen im Vergleich zu durchschnittlichen Abtragstiefen höhere Werte. Funktionale Probleme entstehen durch einen lokalen Abtrag meist nicht, da die Gesamtfestigkeit der Komponenten nur in einem geringen Maß nachlässt. Jedoch können bei dünnen Grundmaterialien Löcher entstehen und Komponenten undicht machen, was zum Versagen führen kann.

Die steinschlaginduzierte Korrosion ist in erster Linie ein optisches Thema. Wegen der Reduzierung von Grundmaterialdicken (Leichtbau) muss jedoch verstärkt auf das Thema steinschlaginduzierte Korrosion eingegangen werden, damit sich funktionale Korrosionsschäden vermeiden lassen. Punktuell ist es jedoch möglich, dass der Korrosionsfortschritt stark fortschreiten kann. Hierbei ist vor allem ein Defekt an der Polymer-Substratgrenzfläche verantwortlich, der in Form einer Delamination auftritt. Hierbei kann Feuchtigkeit sich unter Beschichtungen ansammeln und zu einem dauerfeuchten Klima führen.

Zusätzlich kann durch eine Kombination von konstruktiven Schwachstellen, Schweißnähten und einer Steinschlagbelastung eine weitaus höhere Gefahr des korrosiven Materialabtrags hervorgerufen werden. Hierbei werden Schichten bereits in einem frühen Stadium der Fahrzeugnutzung zerstört und Korrosion kann an Wärmeeinflusszonen oder an konstruktiven Schwachstellen mit Wasseransammlung verstärkt fortschreiten. Steinschlag kann dabei auch die durch Korrosion entstandenen Schutzschichten verletzen oder sogar vollständig entfernen. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass eine Kombination von Belastungen und Schwachstellen vermieden wird, da dies einen direkten Einfluss auf den Materialabtragswert durch Korrosion hat.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Gebrauch eines Fahrzeuges kommt es zu vielfältigen umwelt- und fahrspezifischen Belastungen. Unter anderem zu Steinschlag, der Beschädigungen an Beschichtungssystemen verursacht, die einen optischen oder korrosionsrelevanten Einfluss haben. Durch umweltspezifische Einflussgrößen kann ein Elektrolyt an der Defektstelle eine Delamination des Beschichtungssystems und einen Korrosionsfortschritt mit einhergehendem Materialabtrag des Substrates hervorrufen.

Der Steinbewurf geht zu einem hohen Anteil vom eigenen Fahrzeug aus, indem Steine vom Vorderrad abgeworfen werden und den Unterflur sowie die Karosserie treffen. Die Mitnahme von Steinen hängt stark vom Fahrzustand des Fahrzeuges ab. Bei steigenden Fahrgeschwindigkeiten nimmt der maximale Winkel, den Steine vom Rad mitgenommen und wieder abgeworfen werden ab, wohingegen die Anzahl an abgeworfenen Steinen zunimmt. Feuchte Straßenbedingungen verursachen eine erhöhte Mitnahme von kleinen Steinen, die lange Haftzeiten aufweisen. Der Abwurf von Steinen erfolgt im Inertialsystem betrachtet, tangential zur zykliden Bahnkurve, wohingegen im Relativsystem Steine tangential vom Reifen abgeworfen werden. Zusätzlich kann eine seitliche Geschwindigkeitskomponente, erzeugt durch elastische Eigenschaften des Reifens, die Steinflugbahn beeinflussen. Dieser Effekt des seitlichen Abwurfes wird durch relative Geschwindigkeiten (durchdrehen, gleiten) zwischen Reifen und Fahrbahn durch Quetscheffekte verstärkt. Der ermittelte Steinbewurf von Fahrzeugen wurde unter Annahme spezifischer Fahrsituationen in eine computerbasierte Steinschlagsimulation (CFD-Simulation) integriert, die eine Prognose von steinschlaggefährdeten Bereichen und deren Intensität ermöglicht.

Durch abgeworfene Steine von Vorderrädern können Beschichtungen von Komponenten verletzt werden. Der Beschädigungsgrad von Beschichtungen ist vor allem von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig, da die relative Geschwindigkeit von Steinen und Komponenten mit Fahrgeschwindigkeit zunimmt. Auch der Aufprallwinkel ist ein entscheidendes Kriterium der Beschädigungsart. Dabei kann eine Delamination, ein Schichtverlust oder eine Kombination aus beiden auftreten.

Der folgende Korrosionsfortschritt an Defekten zeigt in verschiedenen Korrosionstests einen unterschiedlich starken Korrosionsangriff des Grundmaterials und der

delaminierten Fläche. Dieser Korrosionsfortschritt kann jedoch nicht direkt mit Komponenten aus Feldfahrzeugen korreliert werden, da unterschiedliche umweltspezifische Einflussgrößen ein regionsspezifisches dynamisches Korrosionsverhalten hervorrufen. Komponenten aus unterschiedlichen Regionen weisen hierbei ein von den Umweltbedingungen (rel. Luftfeuchtigkeit, Niederschlagsmenge, Chloridgehalt im Niederschlag, pH-Wert des Niederschlages, Chloridgehalt auf der Straße, Schneetage, Schwefeldioxidgehalt der Luft, Feinstaubbelastung) abhängiges Korrosionsverhalten auf. Der maximale flächige korrosive Abtrag des Grundmaterials, kann durch eine Prognoseformel ermittelt werden. Auch maximale Abtragstiefen können durch eine Korrelation mit umweltspezifischen Einflussgrößen vorhergesagt werden. Diese von einem Defekt auf einer planen Oberfläche ausgehenden Materialabtragsraten haben jedoch im Vergleich zu geometrisch geformten Oberflächen, an denen eine Ansammlung von Wasser und Verschmutzungen auftreten kann, einen geringeren Wert. Je nach Auslegung des Grundmaterials handelt es sich meist um ein optisches Thema. Durch den Leichtbau und immer geringer werdende Grundmaterialstärken, kann es jedoch bei dünnen Materialien zu einer funktionellen Beeinträchtigung kommen. Darum ermöglicht das erstellte Prognosemodell eine Abschätzung des zu erwartenden Abtrages, um eine optimale Grundmaterialstärke oder Beschichtungen zu applizieren oder konstruktiv vor Steinschlag zu schützen.

Im Vergleich zur steinschlaginduzierten Korrosion weisen dauerfeuchte Bereiche und Schweißeinflusszonen stärkere Materialabtragsraten auf.

Um eine Verbesserung der Lokalisation und Analyse von Steinschlagbeschädigungen und des Korrosionsfortschrittes im Vergleich zu aktuellen Methoden wie der visuellen Begutachtung, der digitalen Bildverarbeitung, der elektro-chemischen Impedanzspektroskopie und der Raster Kelvin Sonde zu erzielen, wurde die Puls-Phasen-Thermographie untersucht. Diese Methode analysiert die individuellen thermischen Kontaktwiderstände, die durch Steinschlagbeschädigungen und Korrosion verursacht werden. Es können unterschiedliche Defekte durch eine thermische Analyse von Amplituden- und Phasenwerten differenziert und ausgewertet werden. Dadurch wird eine schnelle und reproduzierbare Analyse von Steinschlagdefekten ermöglicht. Auch der Korrosionsfortschritt kann durch eine thermische Änderung des Materials und durch den Delaminationsprozess zerstörungsfrei detektiert und verfolgt werden.

Um den Korrosionsfortschritt an Komponenten prognostizieren zu können wird es in Zukunft nötig sein, weitere Materialien (Aluminium, Magnesium usw.) sowie Beschichtungssysteme (Zinklamellen, metallische Beschichtungen usw.) zu untersuchen. Zusätzlich muss der Einfluss von konstruktiven Elementen (Schweißnähte, geometrische Form usw.) untersucht werden, da diese einen großen Einfluss auf den Korrosionsfortschritt, selbst bei gleichen Materialien, haben kann.

## 6 Literaturangaben

- [1] Bless S. J., Cross L., Piekutowski A. J., Swift H. F., FOD (Foreign Object Damage) Generation by Aircraft Tires, Dayton Univ. OH Research Inst, 1983
- [2] Zehnder A.T., Ramamurthy A.C., 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
- [3] 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, Issue 10, (1996) 1021-1029,
- [4] Raymond M. Brach, Impact dynamics with applications to solid particle erosion, *Int. J. Impact Engng* Vol. 7, No. 1, (1988) 37-53
- [5] Kantak A. A., Davis R. H., Collision of spheres with wet and dry porous layers on a solid wall, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, Issue 2, (2006) 417-427
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Ramamurthy A. C., XIV Int. Conf. High Pressure Science and Technology, American Physical Society, Colorado Springs, CO, June 1993
- [9] Ferry J. D., *Viscoelastic Properties of Polymers*, Wiley, New York, 1980
- [10] Papini M., Spelt J.K., The plowing erosion of organic coatings by spherical particles, *wear*, Vol. 222, Issue 1, (1998) 38-48
- [11] Papini M., Spelt J. K., Organic Coatings removal by particle impact, *wear*, Vol. 213, Issue 1-2, (1997) 185-199
- [12] Kleis I., Hussainova I., Investigation of particle - wall impact process, *Wear*, Vol. 233-235, (1999) 168-173
- [13] Chau K. T., Wong R. H. C., Wu J. J., Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, Issue 1, (2002) 69-77

- [14] Grondin G. Y. Damage Functions for Service Life Prediction of Zinc and Steel Components, Internal Report, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, No. 647, (1993)
- [15] Kucera V., Tidblad J., Kreislova K., Knotkova D., Faller M., Reiss D., Snethlage R., Yates T., Henriksen J., Schreiner M., et al., UN/ECE ICP Materials Dose-response Functions for the Multi-pollutant Situation, In: Water, Air & Soil Pollution: Hrsg.: Focus, Vol. 7, Issue 1-3 (2007) 249-258
- [16] Stratmann M., Feser R., Leng A., Corrosion protection by organic films, *Electrochimica Acta*, Vol. 39, Issue 8-9, (1994) 1207-1214
- [17] Stratmann M., Feser R., Leng A., Korrosionsschutz mit organischen Beschichtungen, Vol. 2, *Farbe und Lack* 100, (1994) 93-100
- [18] Leng A., Untersuchung zur Delamination polymerbeschichteter Eisenoberflächen, *Fortschritt-Berichte VDI, Grund- und Werkstoffe, Kunststoffe*, No. 416, VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
- [19] Fürbeth W., Untersuchung zur Delamination von Polymerbeschichtungen auf verzinkten Stahloberflächen, *Fortschritt-Berichte VDI, Grund- und Werkstoffe, Kunststoffe*, No.512, VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
- [20] DIN EN ISO 20567
- [21] DIN EN ISO 9227
- [22] DIN EN ISO 6270
- [23] Grün N., Industrial Application of a Lattice-Boltzmann Method in Car and Motorcycle Aerodynamics, Workshop on Turbulence and Hydrodynamical Instabilities, Excellence Cluster Universe, Techn. Univ. Munich 2008
- [24] Grün N., Virtual Aerodynamics at BMW, JSAE Congress (Paper 20075018), Yokohama, Japan 2007
- [25] Kerschbaum H., Grün N., Complementary Usage of Simulation, Wind Tunnel and Road Tests during the Aerodynamic Development of a New BMW SUV, FISITA World Automotive Congress, Paper F2006M035, Yokohama, Japan, 2006
- [26] Grün N., Application of Lattice Boltzmann Code in Automobiles and Motorcycle Aerodynamics, Lecture Series on "Road Vehicle Aerodynamics", Von Karman Institute, Brussels, Belgium, 2005
- [27] Kortüm W., Lugner P., Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen, Einführung und Beispiele, Springer Verlag (1994) 31ff

- [28] Uhlig R., Beitrag zur Erarbeitung von Steuerungsalgorithmen eines elektrischen Mehrmotorenantriebes für Fahrzeuge an einem Laborversuchsstand, Dissertation TU Cottbus, (1996)
- [29] Continental Reifen Deutschland GmbH, TDC 11/2009, 0130 01065, <http://www.continental-reifen.de>
- [30] Brown R. J., Knill R. B., Kerscher J. F., Todd R. V., Compounding of cis-1,4 Polybutadiene for Tire Applications, Rubber Chem. Tech., Vol. 35, (1962) 546
- [31] Sarbach D. V., Hallman R. W., Cavicchia M. A., Rubber Age, Vol. 98, Issue 11, (1966) 67
- [32] 1967 Annual Book of ASTM Standards, Part 28, Rubber, carbon black, gaskets, Method D2226-65T, Description of types of petroleum extender oils, S. 992 (Am. Soc. Testing Mats., Phil., Penn.)
- [33] Storey E. B., Oil-Extended Rubbers, Rubber Chem. Tech, Vol. 34, Issue 5, (1962) 1402
- [34] Stout W. J., Eaton R. L., Rubber Age, Vol. 99, Issue 12, (1967) 82
- [35] Snyder J.W., Leonard M.H., Carbon clack, In: Introduction to Rubber Technology, Hrsg.: Morton, M., Reinhold Publishing Corp., New York, 1959, S.172
- [36] Studebaker M.L., The Chemistry of Carbon Black and Reinforcement, Rubber Chem. Tech., Vol. 30, Issue 5, (1957) 1400
- [37] Alliger G., Sjothun I.J., eds, Vulcanization of Elastomers, Reinhold Publishing Co., New York, 1967
- [38] Hofmann W., Vulcanization and Vulcanizing Agents, Palmerton Publishing Co., New York, 1967
- [39] Bateman L., Chemistry of vulcanization, In: The Chemistry and Physics of Rubber-Like Substances, Hrsg.: Bateman L., Wiley, New York, 1963 S. 449
- [40] Trivette C. D., Morita E., Young E.J., 2-Mercaptothiazole and Derivatives as Vulcanization Accelerators, Rubber Chem. Tech. Vol. 35, Issue 5, (1962) 1360
- [41] Clark S. K., Mechanics of Pneumatic Tires, University of Michigan, National Highway Traffic Safety Administration, 1981
- [42] Weißmantel C., Kleine Enzyklopädie Struktur der Materie, VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1982
- [43] Popov V. L., Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 1st Edition, 2010



- [44] McFarlane J. S., Tabor D., Adhesion of solids and the effect of surface films, Proc. R. Soc. Lond., Vol. 202, No. 1069, (1950) 224-243
- [45] de Boer M. P., de Boer P. C. T., Thermodynamics of capillary adhesion between rough surfaces, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 311, (2007) 171-185
- [46] Matthewson M. J., Adhesion of spheres by thin liquid films, Philosophical magazine A, Vol. 67, No. 2, (1988) 207-216
- [47] Gierga C., Untersuchungen zur Sortierung mineralischer Rohstoffe durch Flüssigkeitsbrückenbindung nach selektiver Adhäsion an Mineral- und Kunststoffoberflächen, Dissertation RWTH Aachen I.A.R., Shaker Verlag – Betriebswirtschaft, 2001
- [48] Archard J. F., Elastic Deformation and the Laws of Friction, Proc. R. Soc. London, Vol. 243, (1957) 190-205
- [49] Roux S., Schmittbuhl J., Vilotte J. P., Hansen A., Some physical properties of self-affine rough surfaces, Europhys. Lett. 23, (1993) 277-282
- [50] Persson B. N. J., Theory of rubber friction and contact mechanics, Journal of chemical physics, Volume 115, No.8, (2001) 3840-3861
- [51] Dzyaloshinskii I. E., Lifshitz E. M., Pitaevskii L. P., General Theory of Van der Waals' Forces, Soviet Physics Uspekhi, Vol. 4, No. 2, (1961) 153-176
- [52] Grosch K. A., The relation between the Friction and Visco-Elastic Properties of Rubber, Proc. R. Soc. Lond. A 274, (1963) 21-39
- [53] Bronstein I.N., Semendjajew K. A., Taschenbuch der Mathematik, 21./22. Auflage, Harri Deutsch Thun und Frankfurt (Main), 1979
- [54] Persönliche Mitteilung von Hr. Prof. Dr. Martin Förg
- [55] Persson B. N. J., Brener E., Crack propagation in viscoelastic solids, Phys. Vol. 71, Issue 3, 2005
- [56] Santen, L., Physik für Ingenieure I+II, Vorlesungsmanuskript, Saarbrücken, 2004
- [57] Wendler-Kalsch E., Gräfen H., Korrosionsschadenkunde, VDI Buch, Springer-Verlag, Berlin 1998
- [58] Specht J., Die Vorbehandlung von Werkstücken aus Stahl, verzinktem Stahl und Aluminium vor der Beschichtung mit organischen Stoffen, Chemetall
- [59] Rentz O., Beste Verfügbare Techniken (BVT) im Bereich der Lack- und Klebstoffverarbeitung in Deutschland, VDI-Verl., No. 158 von Fortschritt-Bericht VDI, (2003)[

- [60] Öchsner W., Bergk B., Fischer E., Gaszner K., Wasseraufnahme von Beschichtungen: Sorptionsisothermen für Wasser in organischen Beschichtungen und deren Einfluss auf die Beschichtungseigenschaften Farbe und Lack, Volumen 111, Issue 7 (2005) 42-51
- [61] Persönliche Mitteilung von Hr. Dr. Volker Giese
- [62] Timoshenko S.P., Goodier J.N., Theory of Elasticity, 3rd Edn. McGraw-Hill, New York (1972)
- [63] M.Stratmann, R.Feser, A. Leng, Corrosion protection by organic films, Electrochemi. Acta 39, (1994) 1207
- [64] Stratmann M., Die Korrosion von Metalloberflächen unter dünnen Elektrolyt-filmen, Forschungsbericht VDI, Reihe 5, Nr. 339, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994
- [65] Leidheiser H., Wang W., Igetoft L., The mechanism for the cathodic delamination of organic coatings from a metal surface, Progress in Organic Coatings, Vol. 11, Issue 1, (1983) 19-40
- [66] Leidheiser H., Cathodic delamination of polybutadiene from steel - A review, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 1, Issue 1, (1987) 79-98
- [67] Dickie R. A., Floyd F. L., Polymeric Materials for Corrosion Control, in: American Chemical Society Symposium Series, Hrsg.: Dickie R.A., Floyd F.L., Washington (1986)
- [68] Hammond J. S., Holubka J. W., deVries J. E., Dickie R. A., The application of x-ray photo-electron spectroscopy to a study of interfacial composition in corrosion-induced paint de-adhesion, Corrosion Science, Vol. 21, Issue 3, (1981) 239-253
- [69] Ritter J. J., Kruger J., in: Corrosion Control by Organic Coatings, Vol.1, Nace, Houston, Hrsg.: Leidheiser H.,(1981) 28
- [70] Wroblowa H.S., Yen-Chi-Pan, Razumney G., Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, Vol. 69, Issue 2, (1976) 195-201
- [71] Wroblowa H.S., Quaderi S.B., Mechanism and kinetics of oxygen reduction on steel, Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, Vol. 279, Issue 1-2, (1990) 231-242
- [72] Wroblowa H.S., Intermediate products of atmospheric oxygen reduction and the integrity of metal - organic coating interface, Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, Vol. 339, Issue 1-2, (1992) 31-40

- [73] B.Schinking, Schichtanalytische und elektrochemische Untersuchungen zur Abscheidung dünner SiO<sub>2</sub>- und Organosilanschichten auf verzinktem Stahl, Dissertation, 2004 Bochum, Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum
- [74] Bargel H. J., Schulze G., in: Werkstoffkunde, Hrsg.: Bargel H. J., Schroedel, (1978) 71
- [75] Käsche H., Die Korrosion der Metalle, Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme, 3.Auflage, Springer, Berlin Heidelberg New York, (1990)
- [76] Schnier K., Einfluss der Oberflächenbehandlung auf das Delaminationsverhalten verschiedener autophoretisch und kathodisch abgeschiedener Beschichtungen, Masterarbeit, FH Südwestfalen
- [77] Morcillo M., Feliu S., Mapas de Espana de corrosividad atmosferica, Programa CYTED, 1993
- [78] ISO 9223, Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres-Classification, 1992
- [79] Kucera V., Mattsson E., Atmospheric Corrosion, in: Corrosion mechanism. Hrsg.: Mansfeld F., Marcel Dekker, Inc. New York, 1987, 211-284
- [80] Arroyave C., Lopez F.A., Morcillo M., The early atmospheric corrosion stages of carbon steel in acidic fogs, Corrosion Science, Vol. 37, Issue 11, (1995) 1751-1761
- [81] Mendoza A.R., Corvo F., Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel, Corrosion Science, Vol. 41 Issue 1, (1999) 75-86
- [82] P.W.Brown, L.W.Masters, Factors Affecting the Corrosion of Metals in the Atmosphere, in Atmospheric Corrosion, Hrsg.: Ailor W. H., John Wiley and Sons, New York, N.Y., (1982) 31-49
- [83] Vernon W.H.J., A laboratory study of the atmospheric corrosion of metals. Transactions of the Faraday Society, Vol. 31, (1935) 1668-1699
- [84] Deutsche Gesellschaft für Chemische Apparatewesen, Dechema-Werkstoff-Tabelle, 37. Ergänzungslieferung, Atmosphäre, 1995
- [85] Knotková-Čermáková D., Vlčková J., Kuchyňka D., Atmosphärische Korrosion des Eisens bei periodischer Befeuchtung, Materials and Corrosion, Vol. 24, Issue 8, (1973) 684-691
- [86] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Technische Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenverkehrs, TL-Streu, (2003) FGSV Verlag GmbH, Köln

- [87] Sereda P., Weather Factors Affecting Corrosion of Metals, Corrosion in Natural Environments, ASTM STP 558, American Society for Testing and Materials, (1974) 7-22
- [88] Nürnberger U., Schadstoffbelastung von Befestigungsmitteln und deren normenmäßige Erfassung in Deutschland, Befestigungsmittel im Hochbau. Korrosionsprobleme und Abhilfemaßnahmen. 3-Länder-Korrosionstagung, Frankfurt 2007,
- [89] Bergmann W., Anwendung, Werkstofftechnik Teil2 , 4., aktualisierte Auflage, Hanser Verlag 1987 s335
- [90] Prüfung und Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit von Stählen, Verein deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, (1973) 49
- [91] Persönliche Mitteilung von Fr. Prof. Dr. Virtanen
- [92] Kunze E., Korrosion und Korrosionsschutz, Band 1-6, Auflage 2001
- [93] Ericsson R., Sydberger T., Influence of SO<sub>2</sub>, periodical wetting and corrosion products on the atmospheric corrosion of steel, Materials and Corrosion, Volume 31, Issue 6, (1980) 455-463
- [94] Tostmann K. H., Korrosion: Ursachen und Vermeidung, 1.Auflage, Wiley-VCH, 2001
- [95] Guttman H., Sereda P.J., Measurement of Atmospheric Factors Affecting the Corrosion of Metals, Metal Corrosion in the Atmosphere, ASTM STP 435, American Society for Testing and Materials, (1968) 326-359
- [96] Lipfert F.W., Effects of Acidic Deposition on the Atmospheric Deterioration of Materials, Materials Performance, Vol. 26, No. 7, (1987) 12-19
- [97] Lipfert F.W., Benarie M., Daum M.L., Metallic Corrosion Damage Functions for Use in Environmental Assessments. Proceedings of the Symposia on Corrosion Effects of Acid Deposition and Corrosion of Electronic Materials, (1986)
- [98] Ramamurthy A. C., Lorenzen W. I., Uriquidi-Macdonald M., Stone impact damage to automotive paint finishes - A statistical and neural net analysis of electrochemical impedance data, Electrochimica Acta, Vol. 38, Issue 14, (1993) 2083-2091
- [99] Mansfeld F., Kendig M. W., Electrochemical Impedance Spectroscopy of protective coatings, Materials and Corrosion, Vol. 36, Issue 11, (1985) 473-483

- [100] Ramamurthy A. C., Sporrang M., Strom M., Strom G., Stone Impact Damage to Automotive Paint Finishes: Impact Induced Corrosion in Painted Pre-Coated Sheet Steels, SAE International, (1993) 932332
- [101] Macdonald J. R., ed. Impedance spectroscopy-Emphasizing solid materials and systems, Wiley-Interscience, New York, 1987
- [102] Grundmeier G., Schmidt W., Stratmann M., Corrosion protection by organic coatings: electrochemical mechanism and novel methods of investigation, *Electrochimica Acta*, Vol. 45, (2000) 2515-2533
- [103] Maldague X., Marinetti S., Pulsed Phase Infrared Thermography, *J.Appl.Phys.*, Vol. 79, (1996) 2694-2698
- [104] Maldague X., Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation, in: *Trends in Optical Nondestructive Testing*, Pramod Rastogi ed., (2000) 591-609.
- [105] Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L., Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity, *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, Issue 9, (1961) 1679-1684
- [106] Karpen W., Berührungslöse und zerstörungsfreie Prüfung von Kunststofflackierungen mit thermischen Wellen, Dissertation, Univ. Stuttgart, Germany, 1993
- [107] Gleiter A., Spießberger C., Busse G., Decay time analysis in pulse thermography, *The European Physical Journal*, Vol. 153, Issue 1, (2008) 377-381.
- [108] Fourier J., Théorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides, in: *Mémoires de l'Académie des Science* 5, (1826), 153-246
- [109] Gonzalez R. C., Wintz P., *Digital image processing*, Addison-Wesley, (1987) 503.
- [110] Busse G., Wu D., Karpen W., Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography, *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, (1992) 3962-3965.
- [111] Carslaw A. V., Jaeger J. C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford Science Publications (1946) 23
- [112] Monchalin J. P., Parpal J. L., Bertrand L., Gagné J. M., Thermal contact probing by photoacoustic effect, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 39, Issue 5, (1981) 391-393

- 
- [113] Lepoutre F., Fournier D., Boccara A. C., Nondestructive control of weldings using the mirage detection, *Appl. Phys.*, Vol. 57, Issue 4, (1985) 1009-1015
  - [114] Patel P. M., Almond D. P., Reiter H., Thermal-wave detection and characterization of sub-surface defects, *Appl. Phys.*, Vol. 43, Issue 1, (1987) 9-15
  - [115] Jaarinen J., Nondestructive Evaluation of Coatings by low-frequency thermal waves, *Acta polytechnica Scandinavica, Applied physics series 162*, Finnish academy of technology, (1988)
  - [116] Zöcke C., Stössel R., Langmeier A., Arnold W., Automatische Erkennung und Charakterisierung von Defekten in CFK-Werkstücken unter Verwendung thermischer Aufnahmen, *DGZfP-Jahrestagung 2007*, Vortrag 51
  - [117] Wu D., Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung. Universität Stuttgart, Fakultät 13, Dissertation 1996