

# 1 Einleitung

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

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

## 1.1 Problemstellung

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

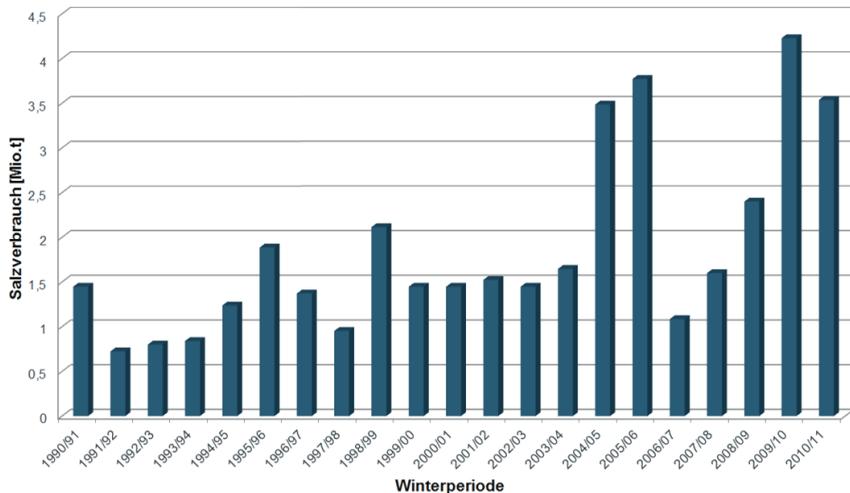


Abbildung 1.1: Darstellung des Streusalzverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland über einen Zeitraum von 20 Jahren [1]

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

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

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

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

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

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

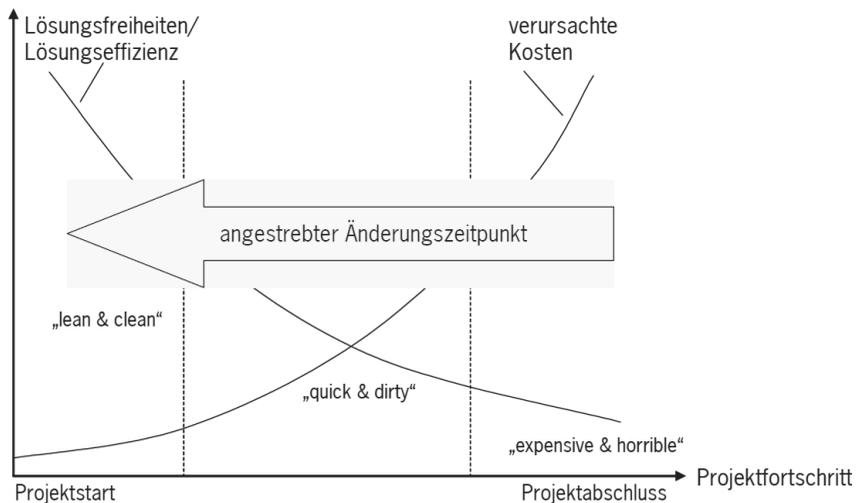


Abbildung 1.2: Änderungsmöglichkeiten und dadurch verursachten Kosten über die Projektlaufzeit [2]

## 1.2 Zielsetzung

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

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

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

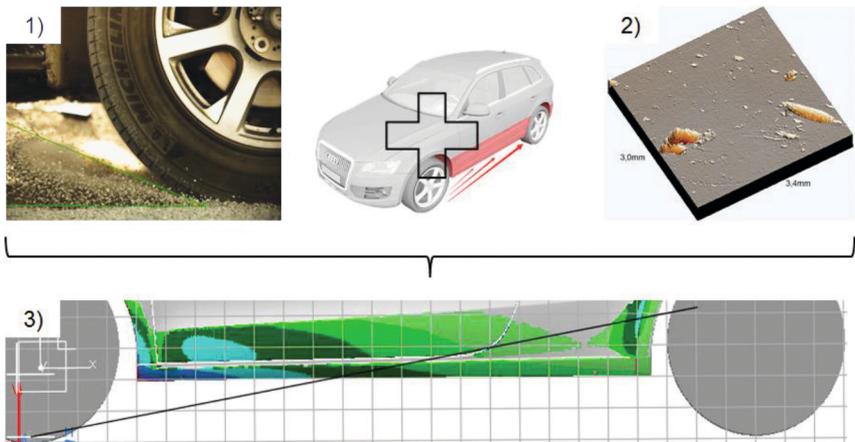


Abbildung 1.3: Übersicht der Vorgehensweise in drei Teilschritten: 1) Analyse des Abwurfvorgangs, 2) Analyse der Oberflächenschädigung bei verschiedenen Auftreffwinkeln, 3) Optimierung des Steinschlagsmodells

## 2 Stand des Wissens

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

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

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

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

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

## **2.1 Definition von Koordinatensystemen**

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

### **2.1.1 Ortsfestes Koordinatensystem**

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

### **2.1.2 Fahrzeugfestes Koordinatensystem**

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

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

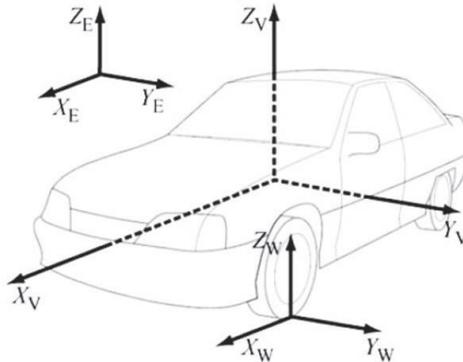


Abbildung 2.1: Koordinatensysteme nach DIN 7000: Ortsfestes und fahrzeugfestes Koordinatensystem [11]

## 2.2 Präventiver Steinschlagschutz

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

### 2.2.1 Lackierung und Lackaufbau

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

Klarlack	30 - 50 $\mu\text{m}$
Basislack	10 - 25 $\mu\text{m}$
Füller	35 - 35 $\mu\text{m}$
KTL	17 - 22 $\mu\text{m}$
Vorbehandlung	
Substrat	
Karosserie	

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

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

### 2.2.2 Steinschlagschutzfolien und PVC-Beschichtungen

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

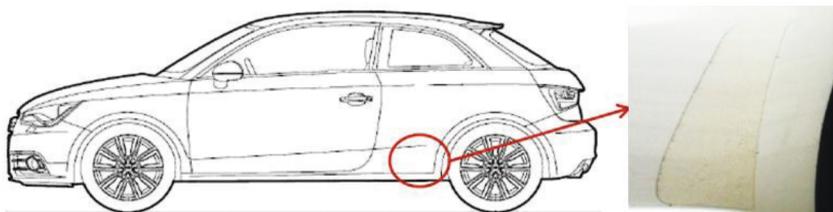


Abbildung 2.3: Steinschlagschutzfolie, beispielhaft an einem Audi A1 dargestellt

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

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

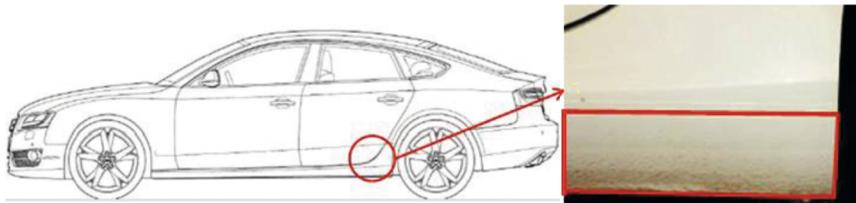


Abbildung 2.4: PVC Beschichtung am Schweller (rot markiert), beispielhaft an einem Audi A5 Sportback dargestellt

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

### 2.2.3 Konstruktiver Steinschlagschutz

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