

Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfkonzepts zur Bewertung von gebrauchten Motorradhelmen

M. Eng. Christopher Petry
petryc@hochschule-trier.de
+49 (651) 8103 – 562

B. Eng. Alexander Pütz
puetza@hochschule-trier.de

Prof. Dr. Michael Schuth
schuth@hochschule-trier.de
+49 (651) 8103 – 396

Abstract

Das vorliegende Paper umfasst die erstmalige Erarbeitung eines wirtschaftlichen Konzepts zur zerstörungsfreien Prüfung von gebrauchten Motorradhelmen. Die Bedeutung der Thematik wird durch eine Beschreibung des aktuellen Stands der Technik mit Statistik aufgezeigt. Die Empfehlungen von Fachinstitutionen für Kunden bzgl. der Bewertung eines potentiell beschädigten Helmes werden als unzureichend definiert, da Ersatzbeschaffungen ohne hinreichende Quantifizierung empfohlen werden.

Eine Analyse des Helmaufbaus und dessen Schutzfunktion verdeutlicht den ausschlaggebenden Einfluss der energieabsorbierenden Helminnenschale. Neben der Deformation dieser Innenschale stehen Risse in der Außenschale ebenfalls im Fokus des zu entwickelnden Prüfkonzepts. Der Hintergrund, der als wirtschaftlich zielführend bewerteten optischen Vermessung des gebrauchten Prüfhelms mittels Holografie, Shearografie und Thermografie, wird aufgezeigt. Anschließend wird der Prüfablauf am Fallturmprüfstand entsprechend der zulassungsrelevanten Regelung ECE-R 22 dargestellt. Durch die Prüfung sollen definierte Beschädigungen im Helm hervorgerufen werden, die es anschließend zu detektieren gilt. Im Anschluss daran wird das Grundprinzip der computertomografischen (CT) Prüfung erläutert.

Die Ergebnisse der Fallturmprüfung (Beschleunigung, Head-Injury-Criterion (HIC)) liegen für den verwendeten Prüfhelm innerhalb der Normbereiche. Durch eine zweifache Belastung der Helmoberseite wird ein Unfall mit einem bereits vorgeschädigten Helm simuliert. Es resultiert ein mehr als 30 % höherer HIC-Wert, was abermals die Bedeutung des Projektes verdeutlicht. Untersuchungen zum Einfluss eines Sturzes des Helms vom Motorradsattel ergeben, dass die Beschädigung des Helmes hierbei als äußerst geringfügig zu bewerten ist. Untersuchungen zu einer provozierten Spaltung

der Helmaußenschale durch einen Kerbschlag werden ebenfalls als sehr geringfügig bzgl. des Einflusses bewertet (für das in diesem Falle thermoplastische Material).

Als erstes wird der Helm rein visuell inspiziert und Schädigungen durch die Fallturmprüfungen beschrieben. Hierzu wird der Helm zerstörend geteilt und zerlegt. Neben oberflächlichen Rissen in der Innenschale und leichten Kratzern an der Helmaußenschale können keine Anomalien festgestellt werden. Die Risse deuten auf eine Materialalterung der sich normalerweise plastisch verformenden Innenschale hin.

Der Vergleich der optischen Messergebnisse vor und nach den Fallturmprüfungen sind wenig aussagekräftig. Risse an der Helmaußenschale können nicht gefunden werden.

Durch eine CT-Prüfung können Risse in der Innenschale ermittelt und deren Abmaße quantitativ bestimmt werden. Die Möglichkeit einer absoluten Dichtevermessung der Innenschale als ausschlaggebender Sicherheitsfaktor bzgl. der Materialalterung wird angesprochen.

Abschließend wird ein Fazit gezogen, in dem alle Ergebnisse dieses Projektes zusammengefasst werden. Es folgt eine Bewertung bzgl. des angestrebten Projektziels, ein wirtschaftliches Prüfkonzept für gebrauchte Motorradhelme abzubilden. Die Realisierung mittels optischer Messtechniken bedarf weiterer Untersuchungen, die mittels CT-Messung wird für höherwertige Helme als grundsätzlich geeignet bewertet. Des Weiteren wird eine Empfehlung für Helmbesitzer zur selbstständigen Helmzustandsbewertung ausgesprochen. Diese ist mit der Expertenmeinung des Instituts für Zweiradsicherheit nur zum Teil konform. Im Ausblick wird u. a. eine angepasste prüf- und reparaturgerechte Helmkonstruktion diskutiert.

Einleitung

Die Helmpflicht für Kraftradfahrer gilt in Deutschland seit den 1970er Jahren und ist mittlerweile selbstverständlich. Die Helme werden stichprobenartig aus der Produktion entnommen, nach ECE-R 22 zerstörend geprüft und zugelassen. Eine Prüfung von gebrauchten Helmen ist nicht vorgesehen. Motorradhelme sollen nach fünf bis sieben Jahren wegen der Materialalterung ersetzt werden. Nach der Empfehlung des Instituts für Zweiradsicherheit (ifz) soll der Helm nach einem Unfall bzw. einem Sturz ausgetauscht werden. So auch, wenn der Kopfschutz „nur“ vom Sattel oder geringer Höhe auf den Boden gefallen ist [1]. Quantifizierbare Angaben oder genaue Bewertungskriterien bezüglich des Schadensmaßes gibt es nicht. Aus diesem Grund müssen Motorradfahrer selbst entscheiden, ob sie ihren Helm austauschen oder nicht. Angesichts der Investitionskosten von durchschnittlich 280 €¹, wird so manchem Kraftradfahrer die Entscheidung schwer fallen.

Basierend auf der unbefriedigenden Entscheidungslage wird im OGKB-Labor² der Hochschule Trier erstmals die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfkonzepts für gebrauchte Motorradhelme überprüft. Hierbei wird die optische Messtechnik als das Mittel der Wahl angesehen, was eine wirtschaftliche Realisierung der zu entwickelnden Prüfmethode betrifft. Die optische Messtechnik arbeitet flächendeckend, hochgenau und berührungslos, wodurch ein schneller, defektsensitiver und einfach umsetzbarer Prüfablauf erreichbar wird.

Helmaufbau und Schutzfunktion

Zuerst gilt es zu verstehen, wie ein moderner Motorradhelm seinen Träger schützt. Dazu ist eine Betrachtung der einzelnen Bauteile und auch deren Werkstoff notwendig. Zu diesem Zweck wurde Kontakt zum TÜV-Rheinland in Köln aufgenommen³ und das Helmprüflabor samt Helmprüfung besichtigt. Ein Helm wird u. a. einer Stoßdämpfungsprüfung, einer Kinnriemenprüfung und einer Abstreifprüfung unterzogen. Für die hier

¹ Durchschnitt wurde aus 5 Marken und Modellen gebildet, die in Deutschland marktrelevant sind

² OGKB: Technikum für optische Messtechnik, Gerätebau, Konstruktion und Bauteiloptimierung

³ Herzlichen Dank an Herrn Schaudt

betrachtete Schutzfunktion ist die Stoßdämpfungsprüfung von besonderer Bedeutung und wird im folgenden Kapitel behandelt.

Ein Motorradhelm besteht im Allgemeinen aus einer Außenschale aus Kunststoff, einer Innenschale aus Polystyrol-Schaum, einem Kinnriemen und diversen Komfortpolsterungen. Die stabile Außenschale schützt vor dem Eindringen von Steinen und Wasser. Außerdem verteilt die Außenschale die Kräfte bei einem Unfall auf eine möglichst große Fläche und sie absorbiert bereits ca. fünf Prozent [2]⁴ der Aufprallenergie. Dabei wird die Außenschale elastisch verformt.



Abbildung 1: Aufgeschnittener Helm nach der Prüfung nach ECE-R 22, mit freundlicher Genehmigung des TÜV Rheinland in Köln, Peter Schaudt [3]

Die Innenschale hat dagegen dämpfende Eigenschaften. Im Falle eines Sturzes wird sie irreversibel verformt und absorbiert so die Aufprallenergie. Eine Beeinträchtigung der Schutzfunktion kann dabei weder von außen noch rein taktil innen „erfüht“ werden.

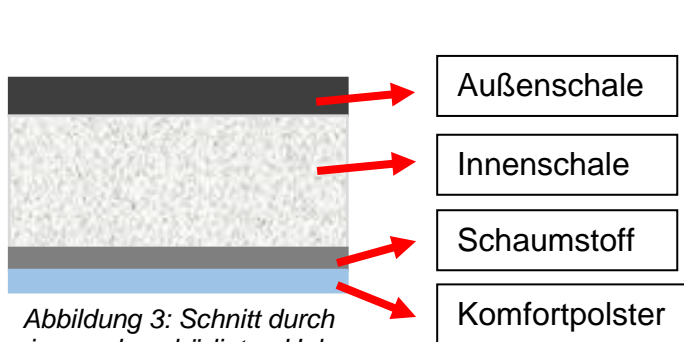


Abbildung 3: Schnitt durch einen unbeschädigten Helm

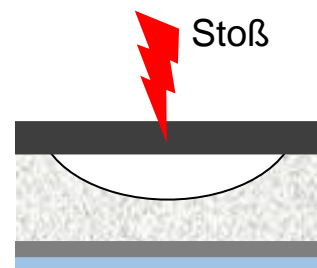


Abbildung 2: Funktionszustand nach Belastung von außen

⁴ Der Hintergrund zu dieser Angabe in der Quelle ist leider nicht aufgeführt.

Im Rahmen einer Prüfung von gebrauchten Helmen ist somit die Außenschale und die Innenschale von Interesse. Deshalb gilt es die Schädigungen dieser Komponenten zu studieren. Die Außenschale ist aus Kunststoff gefertigt. Kunststoff wird im Laufe der Zeit spröde, weil sogenannte Weichmacher ausdiffundieren. Dieser Vorgang erleichtert die Rissbildung im Falle eines Sturzes. Die Innenschale hingegen ist aus Polystyrol, welches mit der Zeit verhärtet und die Energieabsorption dadurch deutlich gesenkt wird.

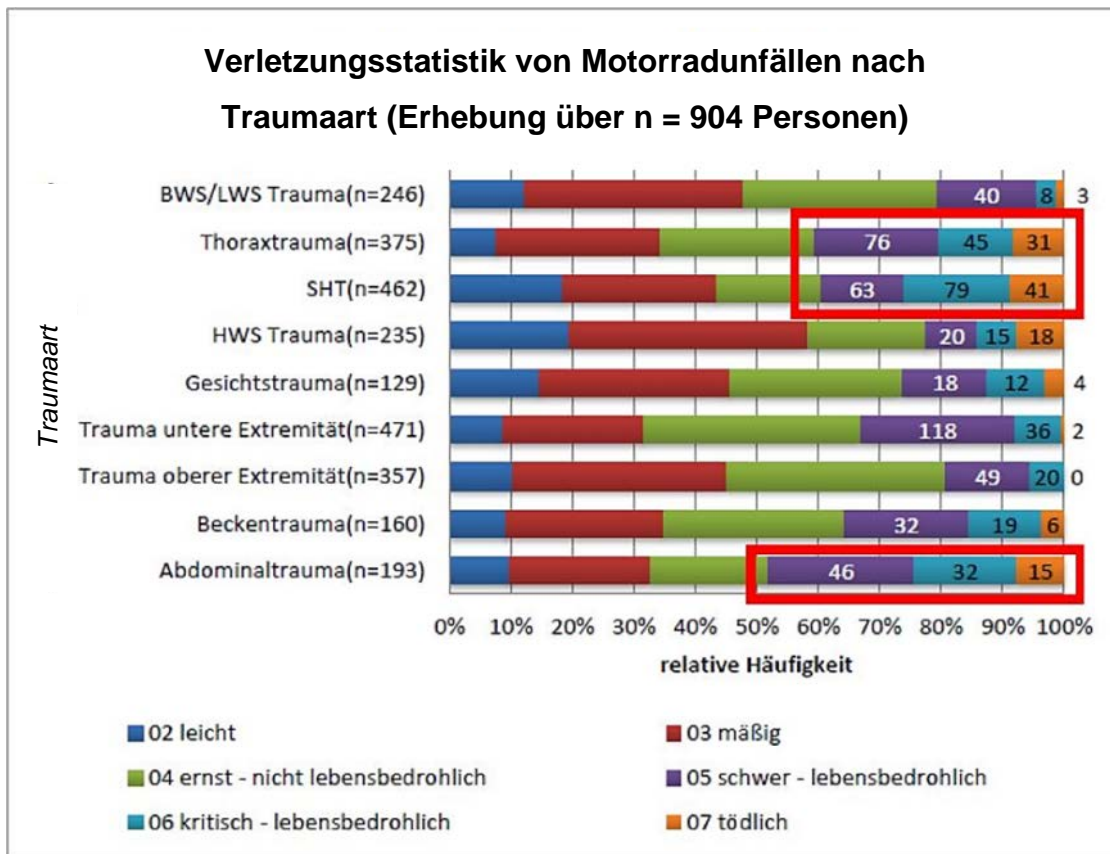


Abbildung 4: Verletzungsstatistik für Motorradunfälle [4] (BWS = Brustwirbelsäule, LWS = Lendenwirbelsäule, SHT = Schädel-Hirn-Trauma, HWS = Halswirbelsäule)

In der Verletzungsstatistik nach Abbildung 4 werden die einzelnen Körperregionen separat aufgeführt. Dabei werden die drei Körperareale, welche die schwersten Verletzungen davontragen, hervorgehoben. Die Wahrscheinlichkeit an einem Schädel-Hirn-Trauma (SHT) zu versterben ist dabei am Größten.

Ablauf und Ziel dieses Entwicklungsprojektes

Zu Entwicklungszwecken für eine Prüfung von gebrauchten Helmen wird ein Helm aus Referenzgründen optisch vermessen. Danach wird eine zerstörende Prüfung nach ECE-R 22 durchgeführt, um bei der nachfolgenden, erneuten optischen Vermessung auf Abweichung und Anomalien bzgl. der Helmeigenschaften zu schließen. Ziel ist es, diese Ergebnisse auch ohne Referenz übertragbar auf sämtliche Motorradhelme zu machen und Schädigungen des Helms zerstörungsfrei zuzuordnen.

Grundlagen der optischen Messtechnik und Betrachtungen zur Auswertung

Die optischen Messtechniken ermöglichen eine hochgenaue, flächige, materialunabhängige und berührungslose Messung. Die flächenhafte Messung macht sie schnell und somit für das angedachte Prüfkonzzept wirtschaftlich. Der Helm wird mittels Holografie, Shearografie und Thermografie untersucht. Diese Verfahren wurden zur Fehlerdetektion der genannten Schädigungen als am erfolgversprechendsten eingeschätzt.

Bei der Holografie und Shearografie handelt es sich um hochsensible, interferometrische Messverfahren, die mittels Laserbeleuchtung arbeiten. Zur Kontrastverbesserung bei der Bildaufnahme werden die Messobjekte mit weißem Pulver besprüht. Mit der Holografie werden relative Verformungen, mit der Shearografie relative Verzerrungen und Dehnungen im Nanometerbereich gemessen.

Bei der Vermessung mit der Holografie wird die Verformung des Helms beim Anlegen einer statischen Gewichtskraft bewertet, was der Rissdetektion in der Außenschale dient. Bei der Shearografie wird das Dehnungsverhalten bei modulierter Wärmeanregung des Helms bewertet, was neben der Rissdetektion auch der Detektion von Verformungen der Innenschale dient⁵. Bei beiden Verfahren ist der Phasenverlauf und die Gesamtdeformation bzw. die Gesamtdehnung von größter Bedeutung. Wenn der homogene Phasenverlauf Unstetigkeiten aufweist, wie an der Trennfuge zwischen Visier und Helmschale in folgender Abbildung zu sehen, kann dies ein Hinweis auf eine Schädigung sein. Ein weiteres Indiz für eine Beschädigung kann zudem die Vergrößerung

⁵ Im Allgemeinen existieren weitere Anregungsmethoden

der Gesamtdeformation/Gesamtdehnung sein, da der Werkstoff durch die Beschädigung an Steifigkeit verliert.

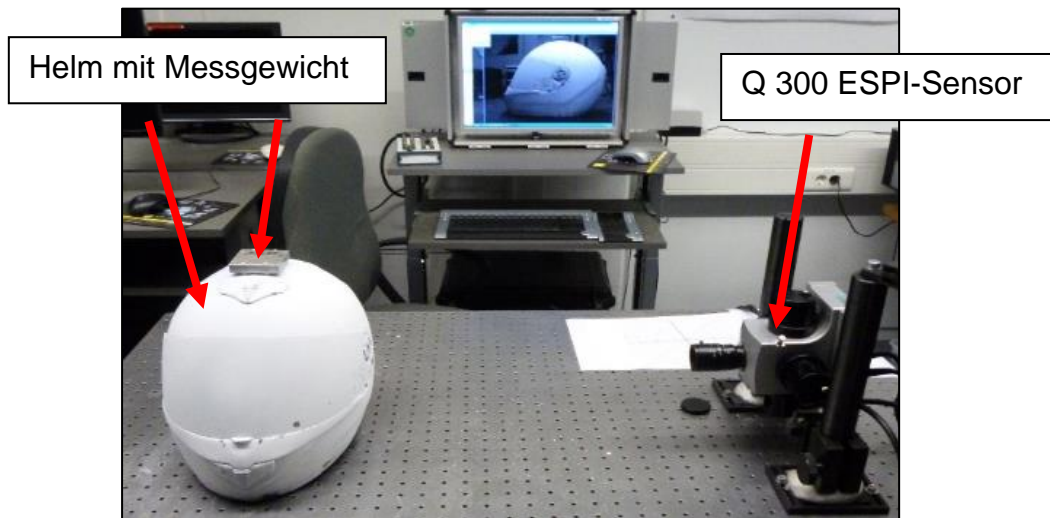


Abbildung 5: Versuchsaufbau für die holografische Vermessung des Motorradhelmes samt Messgewicht bei Belastung von oben

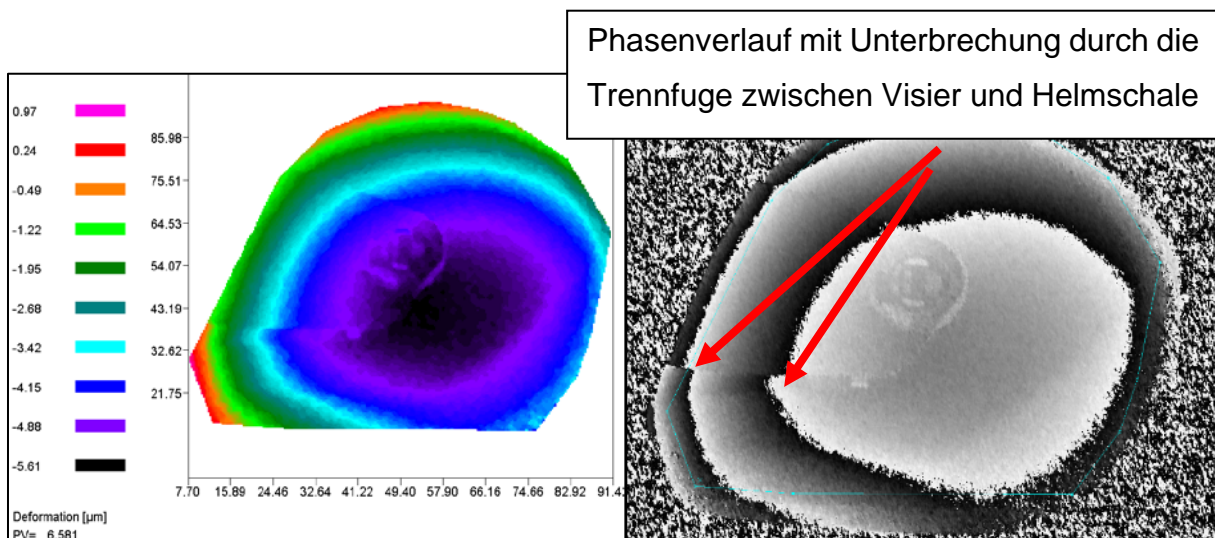


Abbildung 6: Farbskaliertes Ergebnisbild (links) und Phasenbild (rechts) bei Belastung von oben, Messung von links und in-plane Verformungsauswertung in Y-Richtung

Die Thermografie, genauer Infrarotthermografie, ist ein absolutes optisches Temperaturmessverfahren und basiert darauf, dass jeder Temperatur eine elektromagnetische Wellenlänge zugeordnet werden kann, wie Abbildung 7 beispielhaft zeigt. Die thermografischen Messergebnisse sind von vielen Randbedingungen wie Material-Emissionsgrad, Abstrahlwinkel etc. abhängig. Die Einflüsse können jedoch für die hier ange-

strebte Konzeptentwicklung vereinfacht betrachtet werden. Dementsprechend wird lediglich nach sog. „Hotspots“ beim Abkühlen und bei modulierter Wärmeanregung des Helms gesucht, was zur Detektion von Verformungen der Innenschale dient.

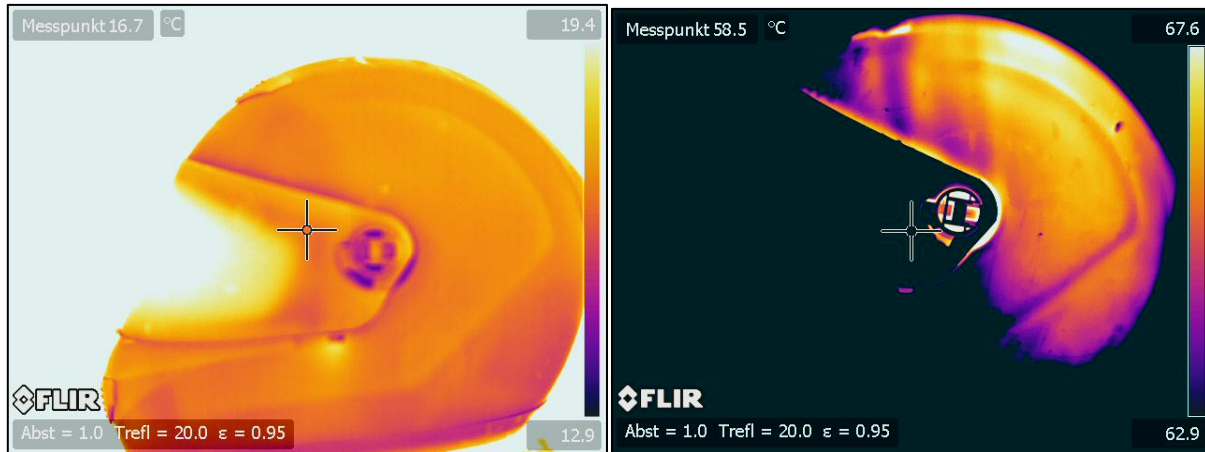


Abbildung 7: Thermografische Aufnahme des Prüfhelms bei einer Umgebungstemperatur von ca. 25 °C, links abgekühlt (Hintergrund weiß, da über 19,4 °C), rechts aufgewärmt mit angepasstem Messbereich (Hintergrund schwarz, da unter 62,9 °C)

Helmprüfung nach ECE-R 22

Im Anschluss an die Referenzmessungen wird der Helm mechanisch belastet. Die Prüfung wird an die Prüfvorgaben der ECE R-22 angepasst. Hierbei wird der Helm inkl. Prüfkopf aus einer Höhe von ca. 3 m auf einen Stahlsockel mit definierter Flächengeometrie fallen gelassen. Die Aufprallgeschwindigkeit liegt bei ca. 27 km/h. Während der Prüfung werden die auftretenden Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen in der Prüfkopfmitte gemessen und daraus das Head-Injury-Criterion⁶ (HIC-Wert) errechnet nach:

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1)$$

Der HIC-Wert dient als Grundlage zur Einschätzung der Kopfverletzungen, die ein Motorradfahrer im realen Schadensfall erleiden würde. Ein HIC-Wert von 1500 bedeutet beispielsweise eine 50 % Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein einer schweren

⁶ hier: HIC36

Verletzung (Maximal abbreviated injury scale: 3) mit einer Todeswahrscheinlichkeit von ca. 4 % [5].

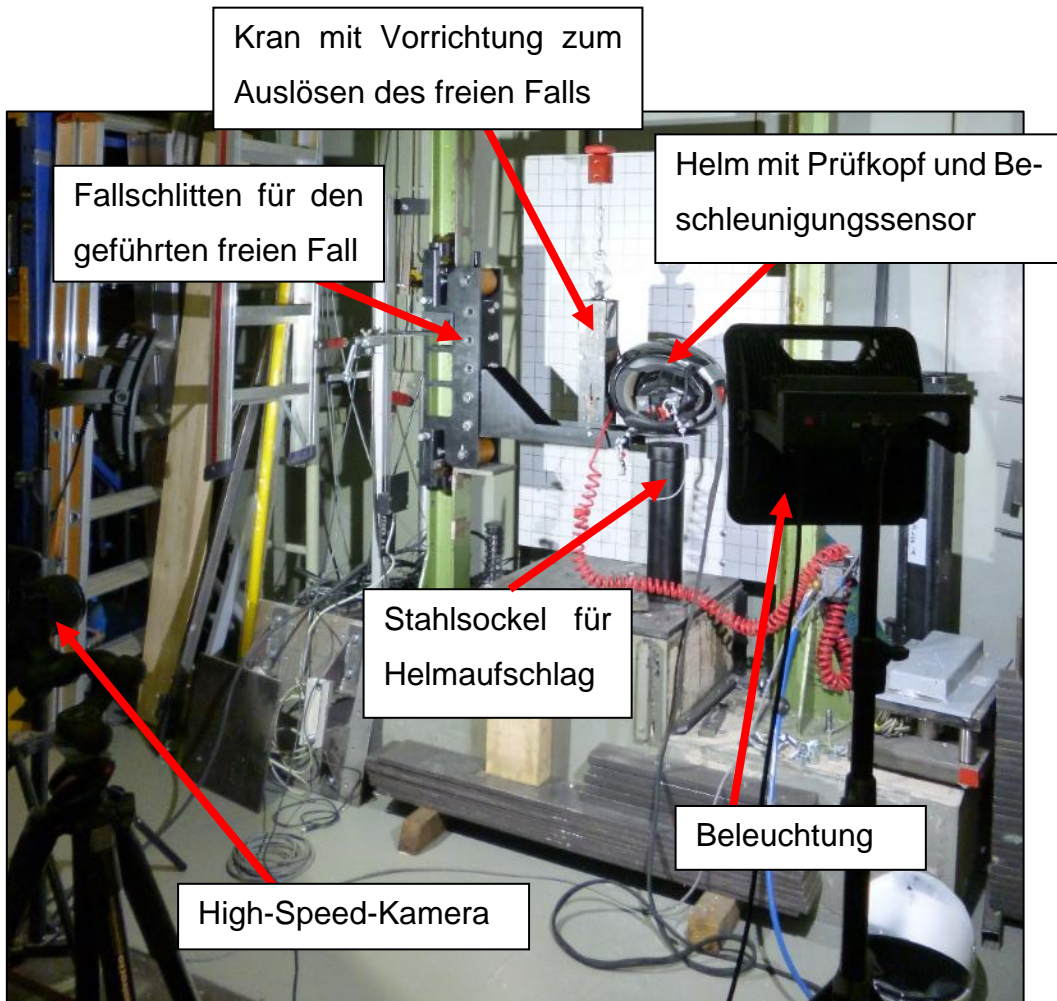


Abbildung 8: Prüfaufbau für die mechanische Prüfung des Motorradhelms in der Maschinenhalle der Hochschule Trier

Computertomografische (CT) Vermessung des Helmes

Die oben aufgeführten optischen Messtechniken erfassen ausschließlich die Objekt-oberfläche eines Messobjektes. Außenliegende Fehlstellen können direkt gemessen werden. Die Auswirkungen innenliegender Fehlstellen können über geeignete Anregungsmethoden „an die Oberfläche gebracht“ und somit ebenfalls bedingt sichtbar gemacht werden. Im Rahmen dieses Projektes wird für nähere Betrachtungen ein weiteres bildgebendes Messverfahren zur Fehlstellendetektion angewendet: Die Computertomografie (CT) erlaubt eine Erfassung der gesamten außen- und innenliegenden Messobjekt-Struktur.

Hierzu wird der Helm einseitig mit hochenergetischer Röntgen-Strahlung durchleuchtet. Ein rückseitiger Sensor erfasst die durch den Helm transmittierte Strahlungsintensität, welche von den Absorptionseigenschaften der jeweiligen Helmmaterialien abhängt. Das Ergebnis ist zunächst eine Projektion des Volumens auf der Sensorfläche. Dies entspricht einem klassischen Röntgenbild, wie es von ärztlichen Untersuchungen bekannt ist. Nun wird der Helm rotiert und weitere Projektionen aus unterschiedlichen Positionen erfasst. Ein mathematischer Rekonstruktionsvorgang aller Projektionen liefert dann ein dreidimensionales Modell des Helmes mit allen innenliegenden Strukturen. Eine optimale Visualisierung der Struktur wird erreicht, indem eine Folge von Schnittbildern entlang einer Koordinatenachse erstellt wird. Abbildung 9 zeigt jeweils zwei Schnittbilder entlang der x-Achse (bezogen auf den Helm von vorne (Kinn) nach hinten (Nacken)) und entlang der y-Achse (von links (Ohr) nach rechts (Ohr)). Hierbei entspricht eine hohe Intensität (weiß) einer hohen örtlichen Materialdichte, eine geringe Intensität (schwarz) einer geringen Dichte. Videos der aneinandergereihten Schnittbilderfolge sind unter <https://goo.gl/W4Aggc> zu finden.

Im Bereich der aktuellen Motorradhelmentwicklung hat sich der Einsatz von CT Systemen teilweise bereits etabliert [6] [7] [8]. Hierbei dienen die Untersuchungen jedoch ausschließlich den Helmherstellern zur Helmdesignentwicklung oder zur Validierung von Crash-Test-Simulationsmodellen. Durch die enorme Weiterentwicklung und damit einhergehende Schnelligkeit der CT-Messverfahren in jüngster Zeit wird daher innerhalb dieses Projektes erstmals eine wirtschaftliche CT-Prüfung von gebrauchten Helmen erörtert, die dem Träger des Helmes selbst dienen soll.

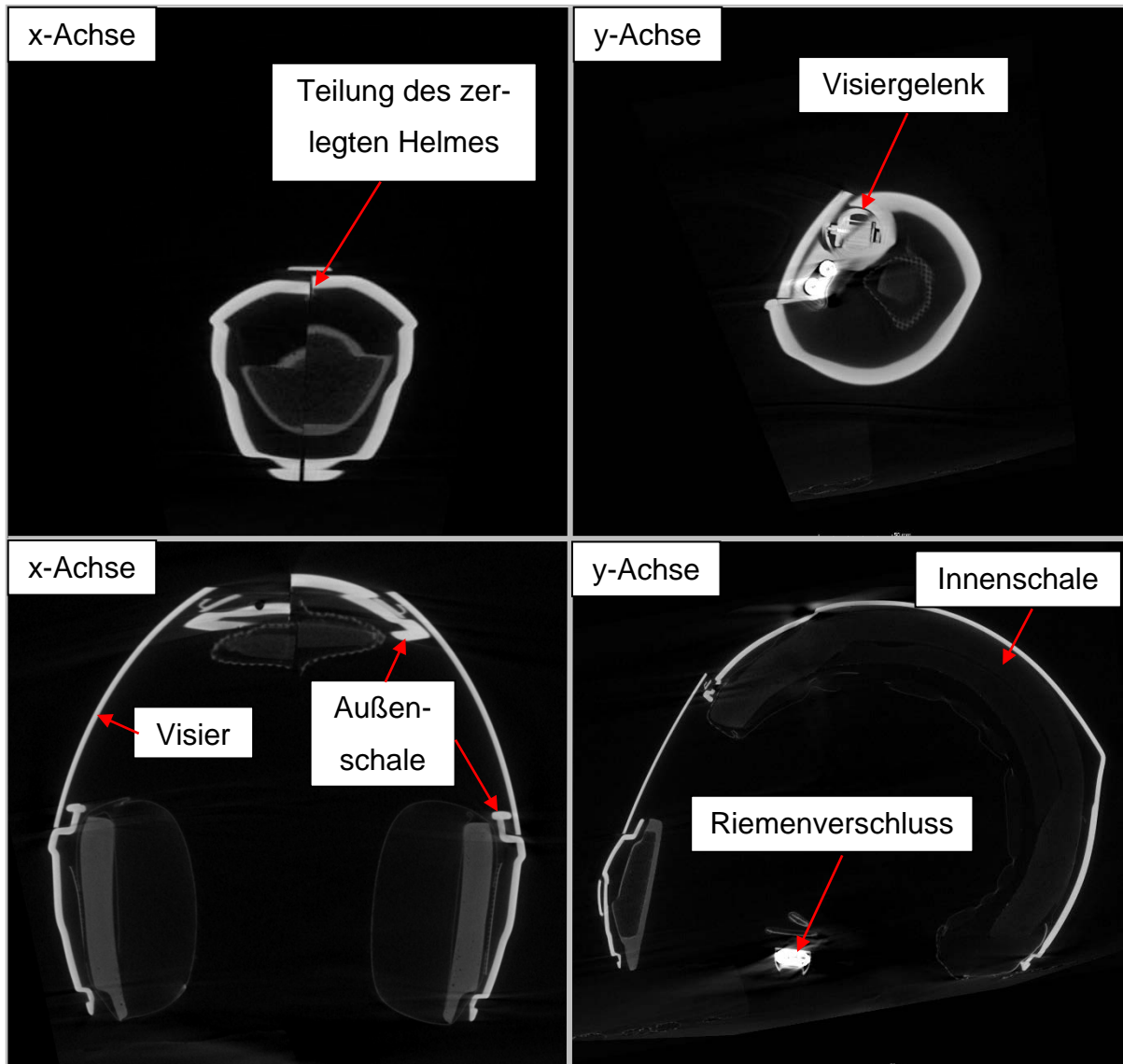


Abbildung 9: Schnittansichten der rekonstruierten CT Messergebnisse, von vorne nach hinten im Kinnbereich (oben links) und Helmmittig (unten links), von links nach rechts im linken Ohrbereich (oben rechts) und Helmmittig (unten rechts); mit freundlicher Genehmigung der Fa. diondo GmbH

Ergebnisse und Diskussion

Zunächst sei erwähnt, dass es sich bei dem Prüfobjekt um einen bereits ca. 10 Jahre alten Helm einer unbekanntenen Marke handelt. Er besitzt eine thermoplastische Außenschale, die, entgegen des Rates von Fachleuten, überlackiert wurde. Er war ca. fünf Jahre in Gebrauch, wobei Beschädigungen durch Unfälle ausgeschlossen werden können, mögliche Stürze vom Sattel jedoch nicht. Die folgende Diskussion wird hinsichtlich dieser Fakten nicht eingegrenzt, sondern vielmehr fallspezifisch betrachtet.

Auf zukünftige Versuche mit neuen Helmen und deren Aussagekraft wird im Fazit eingegangen.

Helmprüfung nach ECE-R 22

Während den Fallturmprüfungen wird der HIC-Wert mit der vorhandenen Messtechnik und Software automatisiert erfasst.

*Tabelle 1: Resultierende Beschleunigungs- und HIC-Werte bei der Helmprüfung nach ECE-R 22
(Werte auf eine Nachkommastelle gerundet)*

Aufprall seitlich links*	
Maximaler Beschleunigungswert [g]	186,3
Zeitintervall** Δt [ms]	3,4
Errechneter HIC-Wert	399,7
Aufprall seitlich rechts*	
Maximaler Beschleunigungswert [g]	194,6
Zeitintervall** Δt [ms]	3,3
Errechneter HIC-Wert	929,2
Aufprall hinten*	
Maximaler Beschleunigungswert [g]	161,5
Zeitintervall** Δt [ms]	5,0
Errechneter HIC-Wert	914,9
Aufprall oben	
Maximaler Beschleunigungswert [g]	241,7
Zeitintervall** Δt [ms]	4,7
Errechneter HIC-Wert	1548,2
Aufprall oben (wiederholt)	
Maximaler Beschleunigungswert [g]	283,4
Zeitintervall** Δt [ms]	4,6
Errechneter HIC-Wert	2112,3

* Bei diesen Messungen war die Position des Beschleunigungssensors nicht normgerecht. Die Werte fallen daher geringer aus. Für das Projektziel ist die Abweichung uninteressant.

** Beachte: Aus Vergleichsgründen ist hier das Zeitintervall angegeben, innerhalb dessen die Beschleunigung höher als 37 % ihres Maximalwertes ist. Das Zeitintervall ist nicht zu verwechseln mit demjenigen, aus dem sich der entsprechend maximale HIC-Wert berechnet.

Tabelle 1 enthält die bei der Prüfung ermittelten Messwerte, aus Vergleichsgründen zusätzlich noch die Beschleunigungswerte und jeweils das Zeitintervall, innerhalb dessen die Beschleunigung höher als 37 % ihres Maximalwertes ist. Die Echtzeit- und Zeitlupen-Videoaufnahmen, zu finden unter <https://goo.gl/W4Aggc>, geben die Dynamik der Prüfungen wieder.

Des Weiteren werden Untersuchungen zur Schädigung des Helmes durch einen „Sattelsturz“ angestellt. Dazu wird die Fallhöhe bei der Fallturmprüfung auf 1,2 m reduziert, was in etwa dem Fall von einem Topcase entspricht⁷. Eine einfache Fallenergiebetrachtung ($E=m \cdot g \cdot h$) zeigt, dass die einwirkende Energie beim Fallen vom Topcase ungefähr 12-mal geringer ausfällt als bei der Prüfung nach ECE-R22. Dies ist vor allem dadurch bedingt, dass der durchschnittlich ca. 5 kg schwere Prüfkopf beim Sattelsturz nicht enthalten ist und der Helm selbst nur ca. 1,2 kg wiegt. Bei einer typischen Sitzhöhe von 80 cm liegt der Faktor bei ca. 18 (also ca. 5,6 % verglichen zur Energie bei der eigentlichen Prüfung), was wiederum nahe der 5 % Energie liegt, die die Außenschale rein elastisch absorbieren kann (vgl. Abschnitt oberhalb von Abbildung 1). Das Video zum 1,2 m Sattelsturz (s. Link oberhalb von Tabelle 1) vermittelt ein Gefühl für die geringere Aufschlagsenergie. Ein eigentlich angestrebter Vergleich des HIC-Wertes der unbeschädigten rechten zur „Sattelsturz-beschädigten“ linken Helmseite ist leider nicht möglich aufgrund des unplanmäßigen Aufpralls im Bereich des Visiergelenks auf der rechten Seite (vgl. Abschnitt unter Tabelle 1).

Als Abschließender, zusätzlicher Test wird in die Außenschale eine Kerbe eingeschlagen, deren Ausmaß deutlich über realen Gebrauchsschäden liegt. Die Kerbe befindet sich im Stirnbereich an der Spritzguss-Formtrennung der Außenschale, die vom Kinn über die Stirn zum Nacken verläuft. Hierdurch soll ein Zerreißen des Helmes provoziert werden. Anschließend wird der Helm am Fallturmprüfstand auf der Kerbe geprüft. Die einwirkende Energie entsprach derjenigen der ECE-R 22. Hierbei, sowie durch alle anderen Belastungen durch die Prüfungen, hat sich keine offensichtliche Rissbildung oder -ausbreitung gezeigt. Somit wird eine Beschädigung der Außenschale durch Risse im Falle dieses Helms als unproblematisch gewertet.

⁷ Der Aufschlag auf den Stahlsockel kann in einer ersten groben Näherung mit demjenigen auf typischerweise einen Asphaltboden gleichgesetzt werden. Die effektive Helm-Aufschlagsfläche beim Stahlsockel ist kleiner als die Sockelfläche selbst, und somit also ebenfalls zum Asphaltaufschlag konform.

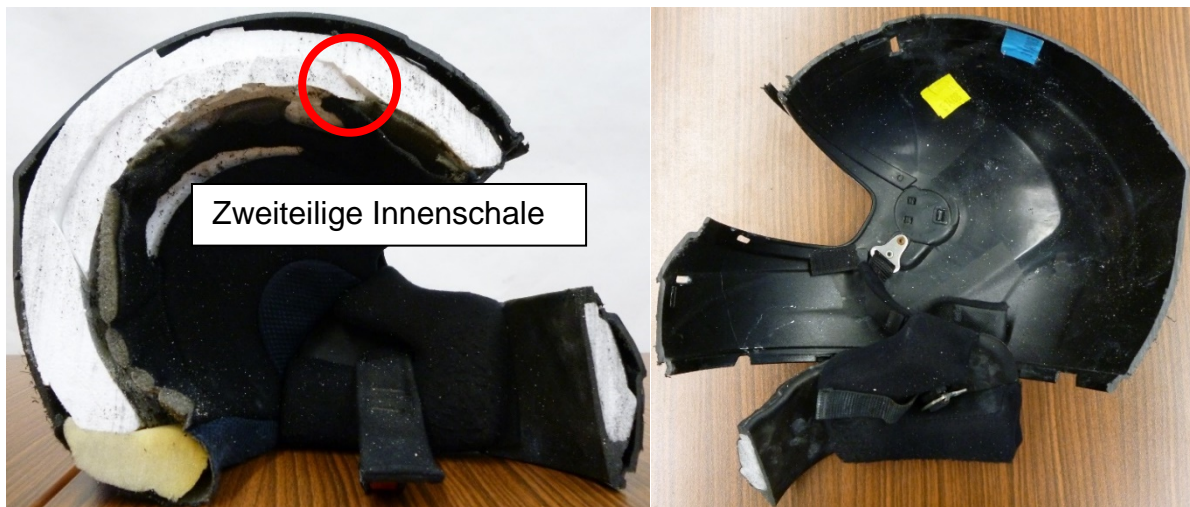
Eingeschlagene Kerbe im
Stirnbereich des Helmes



Abbildung 10: Mit einem Meißel eingeschlagene Kerbe im Kinnbereich der Außenschale

Visuelle Prüfung des zerlegten Helmes

Zur Validierung der im folgenden vorgestellten Ergebnisse wird der Motorradhelm nach Abschluss aller Fallturmprüfungen mittig geteilt, vollständig zerlegt und visuell bewertet, wie durch Abbildung 11 angedeutet.



Zweiteilige Innenschale

Abbildung 11: Zerlegung und Bewertung des Helmes nach Abschluss der Fallprüfungen, linke Seite im zusammengebauten Zustand mit zweiteiliger Innenschale (links), Innenansicht rechte Außenschale mit Wangenpolster (rechts)

Trotz der enormen Prüfbelastungen durch die Gesamtheit an Fallturmversuchen können an der Helmaußenschale lediglich äußerliche Kratzer im Bereich der Aufschlagbereiche festgestellt werden, innerlich sind keinerlei Schäden feststellbar. Zudem weist die zweiteilig ausgeführte Innenschale keine Schädigungen in Form von Deformationen auf, was bemerkenswert bzgl. der zu erwartenden Energieabsorption ist. Stattdessen sind an der Innenschale oberflächlich Risse erkennbar, die für die CT Messergebnisse näher aufgezeigt werden. Beides deutet auf eine Aushärtung der Innenschale

hin, wie es auch vom Institut für Zweiradsicherheit (ifz) angemerkt wird (s. Einleitung). Verglichen zu den Richtwerten nach ECE-R 22 liegen die ermittelten Werte durch die Fallturmprüfung innerhalb der Grenzen, könnten für eine deformationsfreudigere Innenschale womöglich aber auch tiefer ausfallen.

Optische Messungen

Der Vergleich der holografischen Messungen vor und nach der Helmprüfung am Fallturm liefert keine eindeutigen Hinweise auf eine Beschädigung der Helmaußenschale z. B. durch Risse. Der Phasenverlauf bleibt im Vergleich zur Referenzaufnahme unverändert. Der einzige Hinweis auf eine schadhafte Veränderung zeigt die Gesamtdeformation, die geringfügig angestiegen ist. Der Messwert kann jedoch nicht mit Sicherheit auf die Schädigung durch die Helmprüfungen zurückgeführt werden, da die statische Messbelastung mittels Gewicht nicht wiederholgenau positioniert werden kann, was einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messung hat.

Die angefertigten shearografischen Untersuchungen lassen ebenfalls keine Rückschlüsse auf etwaige Schädigung der Innen- oder Außenschale des Motorradhelms durch die Fallturmprüfung zu. Das Ergebnis einer fehlerfreien Außenschale deckt sich mit den Ergebnissen der visuellen und der CT-Messung (im folgenden dargestellt). Grundsätzlich ist die Shearografie (und auch die Holografie) zur Detektion von Rissen prädestiniert. An dieser Stelle sei repräsentativ für einen Riss eine Dehnungsanomalie, angezeigt durch eine Verdichtung der Phasenstreifen, an einer Stelle geometrischer Features dargestellt. Abbildung 12 zeigt das Ergebnis einer shearografischen Vermessung des Abkühlverhaltens im Helm-Stirnbereich, wo es durch Aussparungen zu einer erhöhten Dehnung kommt.

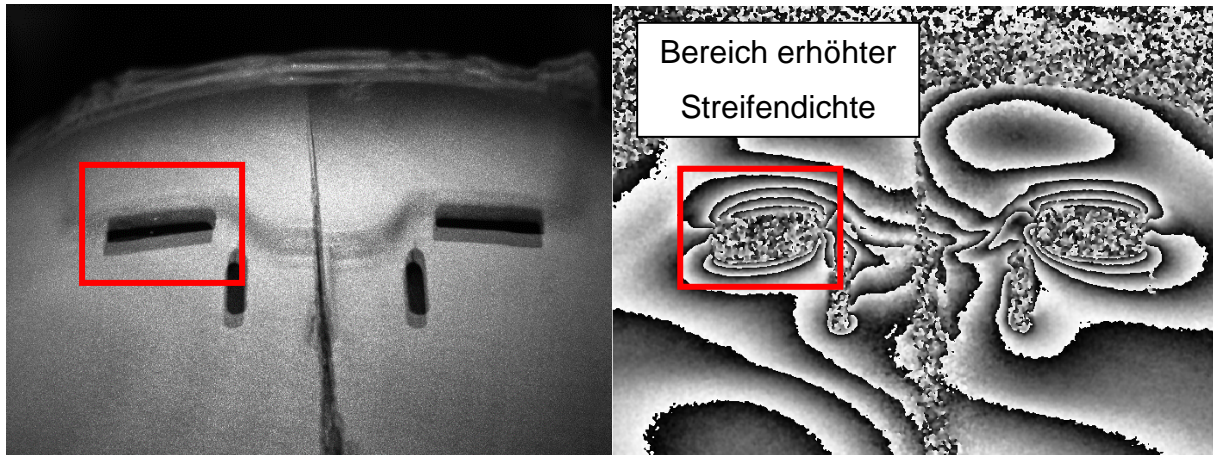


Abbildung 12: Aussparungen im Stirnbereich des Helmes für die Lufteinlassmechanik, links Speckle-Bildaufnahme mit Shearbetrag in y -Richtung, rechts gefiltertes shearografisches Phasenbild nach Abkühlung des Helmes; Helm bereits mittig zerlegt; erhöhtes Phasenstreifenauftreten deutet auf Dehnungsanomalie aufgrund der Materialaussparungen hin

Insgesamt problematisch für die Bewertung einer potentiell deformierten Innenschale ist vor allem die nahezu unveränderliche Steifigkeit der elastischen Außenschale, die das Verformungsverhalten weiterhin zum Großteil beeinflusst. Des Weiteren macht die erst beim Zerlegen des Helmes ermittelte Tatsache, dass die Innenschale nicht mit der Außenschale verklebt ist, eine shearografische Deformationsmessung der Helminnenschale nahezu unmöglich. Recherchen im Vorfeld haben ergeben, dass die beiden Schalen in vielen Fällen zumindest punktuell miteinander verklebt sind. In diesem Fall könnten Ablösungen durch die Deformation der Innenschale shearografisch mittels modulierter Wärmeanregung sichtbar gemacht werden.

Die größten Erfolgsaussichten zeigen sich bei der Thermografie. Mit der Thermografie lassen sich im Bereich der Prüfbelastungen Stellen detektieren, in denen der Temperaturverlauf bei Abkühlung inhomogen verläuft. Da die sog. „Hotspots“ jedoch bereits in den Referenzmessungen existieren, ist eine Zuordnung zu Beschädigungen nicht möglich. Eine enorme Steigerung der Anwendbarkeit der Thermografie wäre, wie auch bei der Shearografie, durch eine Verklebung der Innen- mit der Außenschale gegeben, was bei dem untersuchten Helm nicht der Fall war.

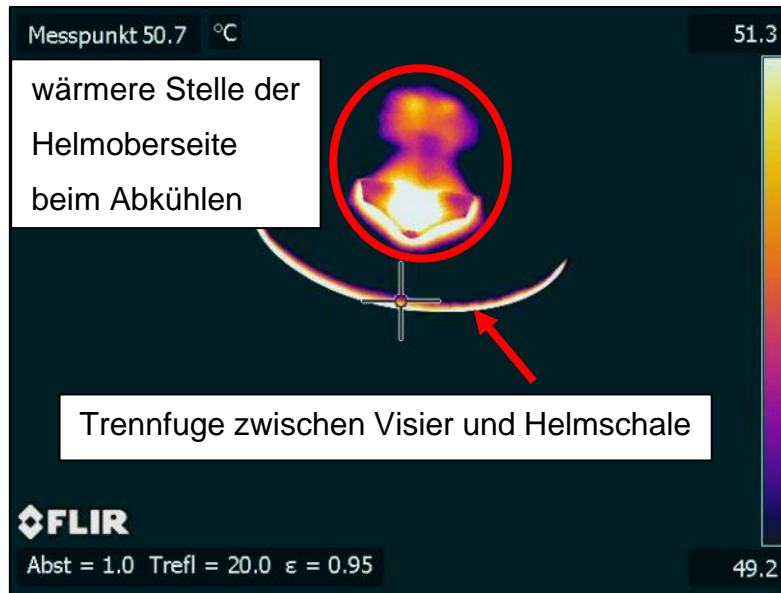


Abbildung 13: Thermografiebild der geprüften beschädigten Helmoberseite

CT Prüfung

Durch die CT-Prüfung des zerstörten Helmes können die bereits bei der visuellen Prüfung entdeckten oberflächlichen Risse in der Innenschale gefunden und bzgl. ihrer Ausmaße nun zusätzlich quantitativ bewertet werden. (U. a.) im Schläfenbereich sind je zwei Risse in der Innenschale zu finden, die bzgl. der Schnittansicht nach Abbildung 14 eine Länge von ca. 7,5 mm bzw. 5 mm und eine Tiefen (orthogonal zur Ansicht) von ca. 37 mm bzw. 23 mm bei einer maximalen oberflächlichen Rissflankenöffnung von ca. 0,5 mm aufweisen. Des Weiteren können (u. a.) zwei Risse im Stirnbereich nach Abbildung 15 von ca. 10 mm Länge und ca. 4 mm Tiefe, im rechten Nackenbereich nach Abbildung 16 von ca. 20 mm Länge und ca. 3,5 mm Tiefe identifiziert werden. Diese wie weitere Risse reichen bis an die Oberfläche der Innenschale, können aber aufgrund der bestenfalls sehr geringen Rissflankenöffnung visuell nicht ohne weiteres gefunden werden. Wie bereits diskutiert wird angenommen, dass die Risse in der Innenschale aufgrund der altersbedingten Materialversprödung durch die Fallturmprüfungen entstanden sind. Ein Vergleich zum Zustand vor den Prüfungen ist leider nicht möglich, da die CT-Messungen erst nach der vollständigen Helmzerstörung erfolgt sind.

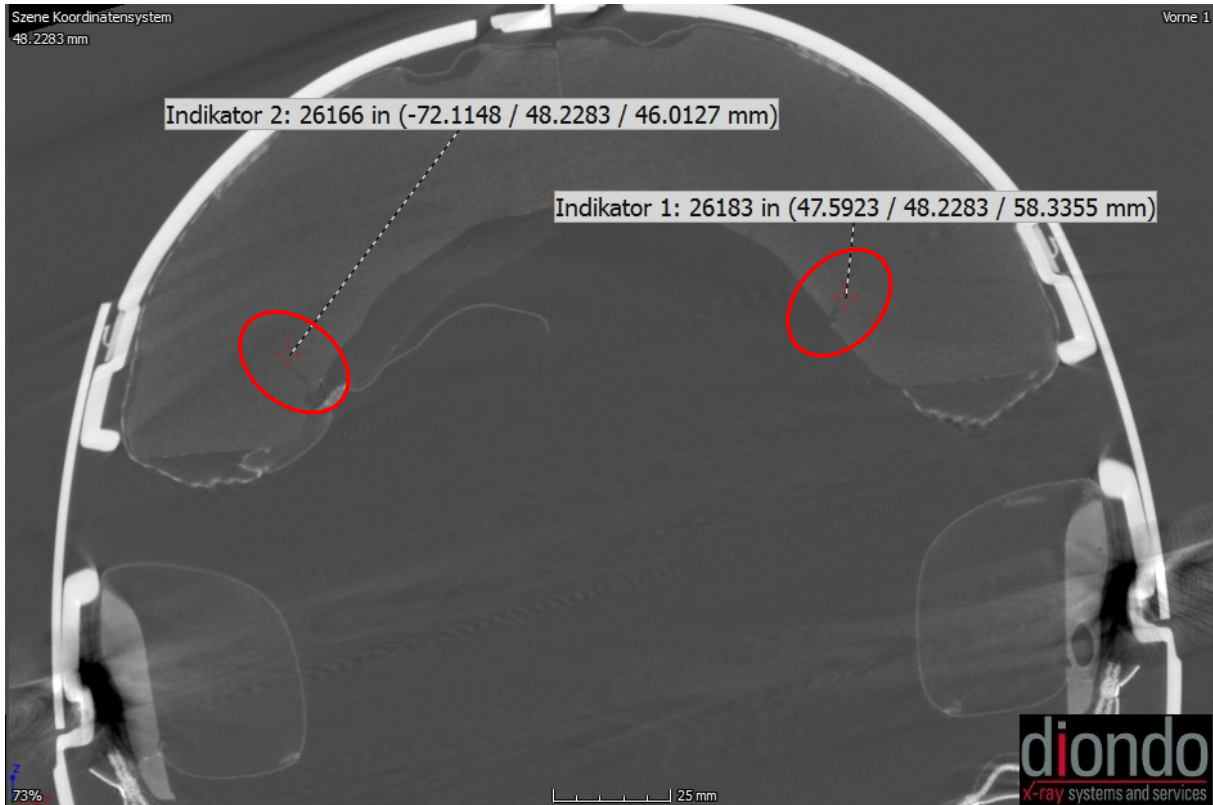


Abbildung 14: äußere Risse (rot umkreist) der Helm-Innenschale im Schläfenbereich, CT-Schnittansicht entlang der x-Achse (von vorne nach hinten); mit freundlicher Genehmigung der Fa. diondo GmbH



Abbildung 15: innenliegender Riss (rot umkreist) der Helm-Innenschale im Stirnbereich, CT-Schnittansicht entlang der y-Achse (von rechts nach links); mit freundlicher Genehmigung der Fa. diondo GmbH



Abbildung 16: innenliegender Riss (rot umkreist) der Helm-Innenschale im rechten Nackenbereich, CT-Schnittansicht entlang der y-Achse (von rechts nach links); mit freundlicher Genehmigung der Fa. diondo GmbH

Für eine genauere Visualisierung bestimmter Stoffe bzw. Stoffdichten kann der Kontrast der Darstellung angepasst werden, sodass die Grauwertverteilung des Bildes möglichst vollständig auf die entsprechenden Bereiche fällt. Dies wird beispielsweise bei der Untersuchung der Außenschale vollzogen, wie Abbildung 17 es zeigt. Die Untersuchung ergibt keine bemerkenswerten Defekte wie Risse oder Brüche. Es sind lediglich die Kratzer an der Oberfläche im Bereich der Aufschlagpunkte bei der Fallturmprüfung ersichtlich, wie es bereits die visuelle Prüfung ergeben hat.

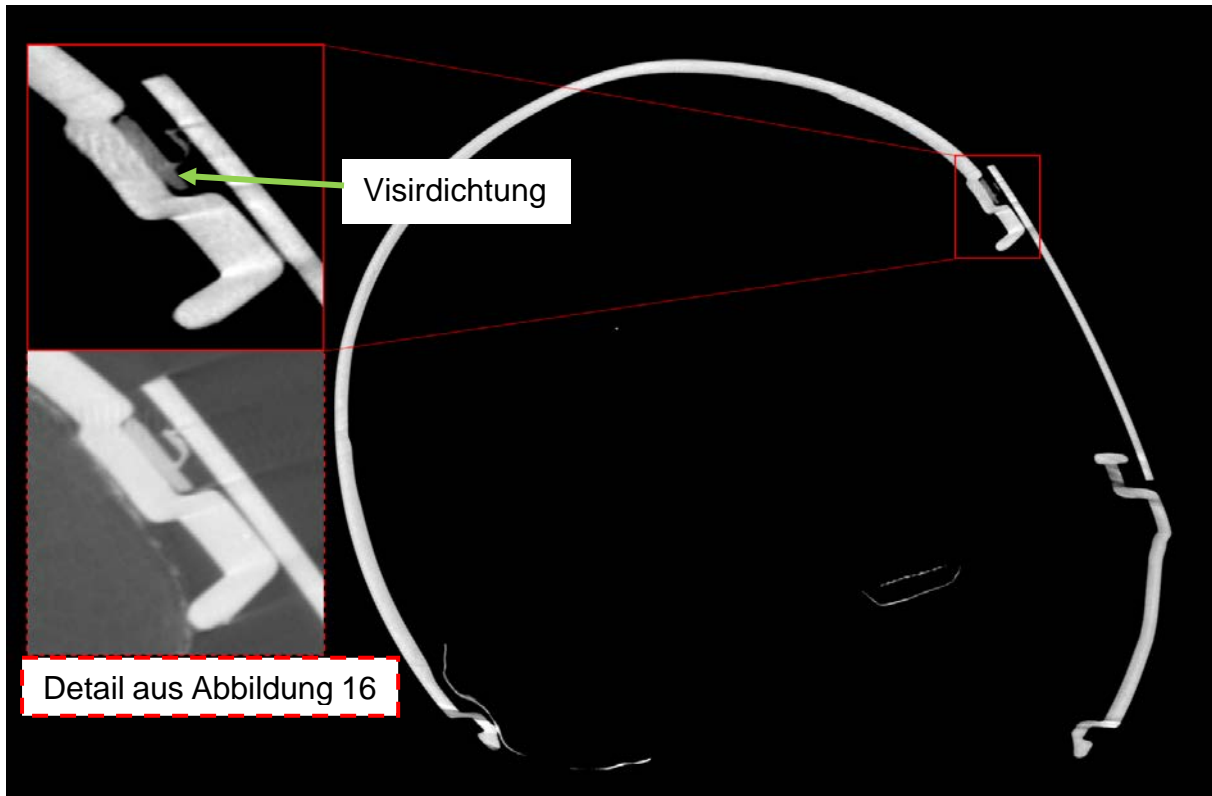


Abbildung 17: Angepasster Kontrast (zu höherdichten Bereichen) des CT-Messergebnisses zur Untersuchung der Helmaußenschale; der Detailvergleich zu Abbildung 16 zeigt, dass sich die Visirdichtung (grau) nun vom Helm- und Visirmaterial (weiß) abgrenzt; das Material der Innenschale ist hingegen nicht mehr erkennbar; mit freundlicher Genehmigung der Fa. diondo GmbH

Wie bereits bei der Rissdetektion (oben) ersichtlich, ist die Auflösung der CT-Prüfung ausreichend hoch⁸, um die Form der Innenschale im zusammengesetzten Helmzustand darzustellen. Dementsprechend würden plastische Deformationen der Innenschale zerstörungsfrei detektierbar sein. In diesem, hier nicht vorliegenden Falle wäre zudem eine dichtespezifische Untersuchung des deformierten Materials von Interesse. Deformierte und somit verdichtete Bereiche der Innenschale können mit angepassten CT-Messparametern vergleichend gegenübergestellt werden. Daraus abgeleitet wäre zudem eine absolute Bewertung der Materialdichte der Innenschale über einen Kalibrierprozess denkbar. Auf diese Weise könnten Rückschlüsse auf die Materialalterung und somit auf die Sicherheit des Helmes geschlossen werden. Abbildung 18 zeigt beispielhaft das Auflösungsvermögen einer CT-Messung, wobei die Dichteunterschiede in dem Polystyrol-Material der Helminnenschale sichtbar werden.

⁸ Örtliche Auflösung lt. Hersteller ca. 0,2 mm, wobei in diesem Falle eine schnelle Messung mit geringeren Anforderungen an die Genauigkeit erfolgt ist.

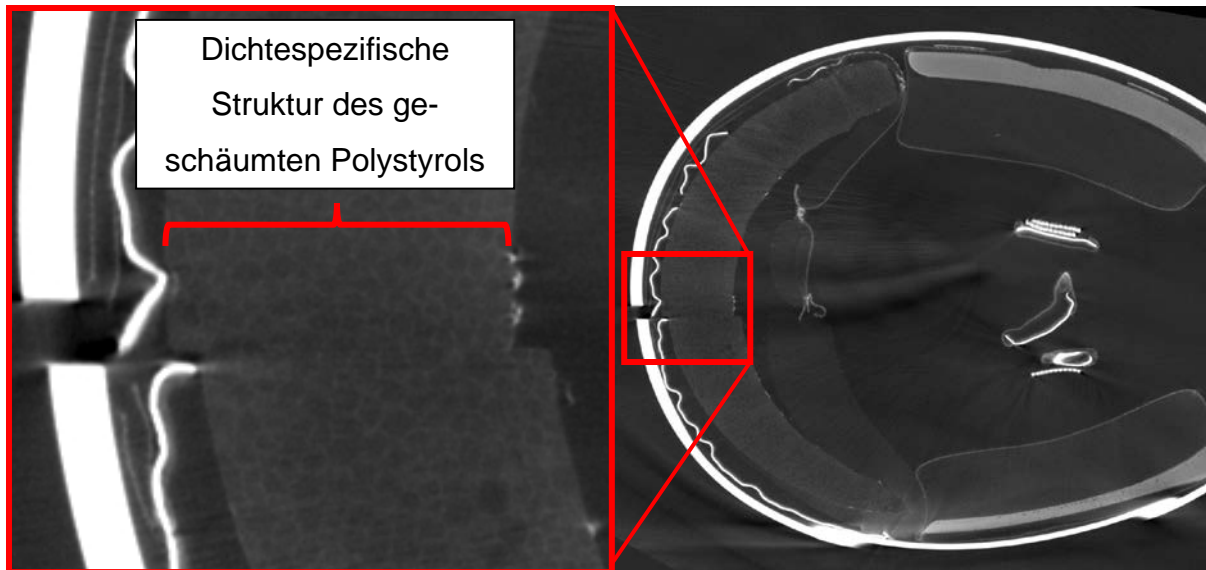


Abbildung 18: Detailansicht des aufgeschäumten Polystyrols der Helminnenschale zur Darstellung der dichtespezifischen Auflösung der CT-Prüfung; Helmansicht von unten; mit freundlicher Genehmigung der Fa. diondo GmbH

Fazit

Die anfängliche Recherche zum Stand der Technik zeigt die Bedeutsamkeit dieses Entwicklungskonzepts zur Bewertung von gebrauchten Motorradhelmen klar auf. Die derzeitige Beurteilungsgrundlage für Helmbesitzer bezüglich des Helmzustandes ist unzureichend. Das Unverständnis demgegenüber ist gegeben, da lebensgefährliche Defekte an Helmen, wie eine deformierte Innenschale, nicht sichtbar sind.

Die schnelle und materialunabhängig arbeitende optische Messtechnik bietet das Potential, die relevanten Schädigungen an einem Helm zu finden. Durch den aktuellen Entwicklungsstand der Messtechnik kommt, bezogen auf die Thematik, erstmals ein wirtschaftlicher Einsatz in Frage.

Die an der Hochschule Trier erfolgten Fallturmprüfungen entsprechend der relevanten Prüfrichtlinie für Motorradhelme, ECE-R 22, unterstreichen die Problematik bzgl. unsichtbarer Helmdefekte abermals. Zudem können die Expertenempfehlungen für Helmbesitzer zur Einschätzung von Helmschäden zumindest teilweise in Frage gestellt werden. Vor allem die experimentellen Betrachtungen bzgl. der Robustheit der Helmaußenschale sowie die theoretische Bilanz bzgl. eines Helm-„Sattelsturzes“ lassen an der empfohlenen Ersetzung des Helmes zweifeln.

Defekte an der Helmaußenschale können mittels interferometrischer optischer Messtechnik (Holografie, Shearografie) grundsätzlich gefunden werden. Eine Bewertung des Deformationszustandes der Innenschale ist mit diesen Methoden und der Thermografie jedoch nicht ohne weiteres möglich. Eine Verklebung der Außen- und Innenschale ließe diesbezüglich weitere, vielversprechende Betrachtungen zu.

Die Vermessung des Motorradhelmes mittels CT liefert anschauliche und detaillierte Ergebnisse, die zur Bewertung des Helmzustands bereits hinreichend sind.

Bewertung der angesetzten Methoden bzgl. eines wirtschaftlichen Prüfkonzeptes

Die Messergebnisse, erzielt durch die optischen Messverfahren Holografie, Shearografie und Thermografie, sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht ausreichend, um eine zielführende Helmbewertung vorzunehmen. Sofern die Hersteller zukünftig eine prüfungsgerechte Helmkonstruktion sicherstellen⁹, wären weitere Betrachtungen, vor allen mit Shearografie und Thermografie, womöglich vielversprechend. Für einen idealisierten Messvorgang wird eine Zeitdauer von ca. 15 Minuten (Messzeit) geschätzt, wobei der Messablauf und die Dokumentation/Bewertung womöglich händisch erfolgen sollte. Die Messgeräte-Anschaffungskosten für ein Shearografie- oder Thermografiesystem belaufen sich auf ca. 50.000 €

Die Messergebnisse durch eine CT-Vermessung liefern eine ideale Grundlage zur Bewertung des Helmzustandes. Dahingegen beläuft sich die Messzeit für eine CT-Messung laut Fa. diondo GmbH auf ca. 30 Minuten. Der Messablauf, wie auch dessen Dokumentation/Bewertung, könnte jedoch einfach automatisiert werden¹⁰. Ein vollständig automatisierter Analysevorgang würde den Helmbesitzer, geschätzt durch Fa. diondo GmbH, ca. 250 € bis 300 € kosten. Das ganze würde sich somit erst für höherwertige Helme, über den durchschnittlichen Kosten von 280 €¹¹, lohnen. Zu beachten sind die Anlagekosten von ca. 200.000 € für ein CT-System mit einem ausreichenden Messvolumen.

⁹ Flächeige Verklebung von Außen- und Innenschale

¹⁰ Z. B. über Bildverarbeitungssoftware

¹¹ Angabe vgl. Einleitung

Empfehlungen bzgl. der Bewertung eines geschädigten Motorradhelmes

Grundsätzlich sollte vom Kauf eines gebrauchten Motorradhelmes abgesehen werden, da eine Vorschädigung nicht zweifelsfrei auszuschließen ist. Das schützende Element, die Inneschale, ist nicht sichtbar und auch nicht beurteilbar. Die Schutzwirkung kann eingeschränkt sein, auch wenn der Helm augenscheinlich unversehrt wirkt. Grobe Schädigungen an der Außenschale lassen erste Rückschlüsse zu. Aufgrund der angestellten Energiebetrachtung ist es zweifelhaft, dass der Motorradhelm beim Sturz vom Sattel einen ernstzunehmenden Schaden nimmt. Die Rissanfälligkeit von faserverstärkten Helmen durch solche Beschädigungen gilt es dabei jedoch nochmals separat zu beurteilen. Bezüglich der Materialalterung wird die Empfehlung des Instituts für Zweiradsicherheit voll und ganz bekräftigt, einen Helm nach fünf Jahren unabhängig vom Gebrauch zu ersetzen. Die endgültige Entscheidung kann jedoch nur der Kraftradfahrer selbst treffen. Dabei sollte er sich fragen: Was ist mir meine Gesundheit wert?

Ausblick

Der in dieser Prüfreihe verwendete Helm unterlag bereits einem starken Alterungsprozess, der nur diesbezüglich spezifische Betrachtungen erlaubte. Deshalb ist es sinnvoll die Prüfungen an einem neuen Motorradhelm zu Entwicklungszwecken zu wiederholen. Auch die Positionierung des Helms am Prüfstand ist zurzeit nur unzuverlässig und muss zur Erzielung weiterer Ergebnisse präzisiert werden. Zudem sollte eine Prüfreihe in Betracht gezogen werden, in der mehrere Helme von mehreren Herstellern unter gleichbleibenden Bedingungen getestet werden. Zukünftig ist die Untersuchung weiterer Helmarten zielführend. Neben der Vielzahl an Fahrradhelmen, die durch die E-Bike Bewegung weiter zunimmt, rücken auch Football-Helme¹² in den Fokus dieses Projektes. Die Kosten für einen brauchbaren Football-Helm belaufen sich auf mindestens 350 €, wobei es nach oben hin „keine“ Grenze gibt.

Ein gänzlich andere Ansatzpunkt wäre die Anpassung der Helmkonstruktion selbst zu einer z. B. prüfungsgerechten Version, wie bereits angesprochen (s. Fazit). Ebenso wird die Austauschbarkeit der sicherheitsrelevanten Innenschale in Betracht gezogen,

¹² S. „american football“

die aktuell nicht gegeben ist. Das Bauteil hat nur einen geringen Materialwert, wobei die gesamten Entwicklungskosten des Helmes natürlich beachtet werden müssen. Unsere Anfragen diesbezüglich an alle großen Helmhersteller blieb, wie zu erwarten, unbeantwortet. Des Weiteren könnte man die Notwendigkeit einer separaten Außenschale allgemein in Frage stellen, verglichen zu einigen Fahrradhelmen, deren Schale vollständig aus Polystyrol bestehen.

Eine kurze Prüfung der Einsatztauglichkeit weiterer, zerstörungsfreier Prüfverfahren¹³ im Sinne dieses Projektes ergab, dass die teils materialabhängige Anwendbarkeit nicht hinreichend zur Fehlerdetektion ist, oder dass der Prüfaufwand nicht wirtschaftlich wäre. Einzig der Einsatz von Terahertz-Tomografie als pendant zur Röntgen-Computertomographie kommt zukünftig in Frage, sofern die Auflösungsgenauigkeit der entsprechenden Sensorik weiter verbessert wird [9].

¹³ Akustische, elektromagnetische, mechanische, weitere optische oder visuelle

Literaturverzeichnis

- [1] D.-I. A. Kuschefski, „Institut für Zweiradsicherheit,“ [Online]. Available: https://www.ifz.de/motorradhelm_nutzungsdauer/. [Zugriff am 23 Oktober 2017].
- [2] V. IG, „www.vulcanier.de,“ 2005-2009. [Online]. Available: <http://www.vulcanier.de/dokumente/gesetze/aufbau.html>. [Zugriff am 07 Juli 2017].
- [3] TÜV-Rheinland, Köln, 2017.
- [4] M. Pschenitza, „ADAC Unfallforschung,“ April 2015. [Online]. Available: https://www.adac.de/_mmm/pdf/28415_234711.pdf. [Zugriff am 25 Juli 2017].
- [5] M. Mackay, „The Increasing Importance of the Biomechanics of Impact Trauma 2015,“ Springer, Sadhana Vol. 32, Part 4, 2007.
- [6] D. P. M. J. T. H. C. G. J. D. S. Kathryn L. Loftis, „UTILIZING COMPUTED TOMOGRAPHY SCANS FOR ANALYSIS OF MOTORCYCLE HELMETS IN REAL-WORLD CRASHES,“ Virginia-Tech - Wake Forest University School of Medicine, Winston Salem, North Carolina, 2011.
- [7] Detection And Radiation Technologies SL, „www.dart-dosimetry.com,“ Detection And Radiation Technologies SL, [Online]. Available: <http://dart-dosimetry.com/products-and-services/>. [Zugriff am 11 05 2018].
- [8] NORTH STAR IMAGING EUROPE, „www.xrayinspectionsservice.com,“ NORTH STAR IMAGING EUROPE, [Online]. Available: <https://xrayinspectionsservice.com/2d-services>. [Zugriff am 11 05 2018].
- [9] B. L. F. B. L. I. M.-H. P. a. P. JP.Guillet1, „Review of Terahertz tomography techniques,“ Université de Bordeaux, France, https://www.researchgate.net/publication/261357792_Review_of_Terahertz_Tomography_Techniques, 2014.